

## RESUM

---

“Els *hydrofoils* i les seves aplicacions” és un treball englobat en l'àrea de la Mecànica de Fluids realitzat per conèixer què són i com funcionen els *hydrofoils* o hidroales i per estudiar la seva incorporació en una embarcació concreta.

Es tracta d'unes superfícies sustentadores en forma d'ala que s'incorporen sota els cascos de les embarcacions per elevar-les respecte el nivell de l'aigua de manera que sembla que l'embarcació estigui volant. D'aquesta manera s'aporta, a més d'espectacularitat, diversos avantatges a les embarcacions, com una gestió més eficient de l'energia necessària per propulsar-les.

Aquest és un treball dividit en dues parts: una primera part teòrica i una segona part experimental. A la primera part s'explica què són les hidroales, com funcionen i quins usos se'ls ha donat al llarg de la història així com també s'aprofundeix en el coneixement dels fenòmens que permeten que un cos pugui generar sustentació. Posteriorment s'inclou informació relativa al procés de disseny i criteris de selecció d'hidroales.

A la segona part, aplicant els coneixements anteriors, es realitza un procés de selecció i optimització d'un perfil per a l'embarcació AC72. Es duu a terme mitjançant l'anàlisi de vuit perfils amb geometries variades i la seva simulació amb el programari VisualFoil 4.1, a partir del qual s'obtenen les dades necessàries per comparar-los entre ells. S'utilitza com a criteri de selecció la maximització del rendiment aerodinàmic del perfil i s'elegeix el més adequat aplicant criteris d'avaluació amb igualtat de condicions. També es busca un rang elevat d'angles d'atac de la hidroala en el qual aquesta treballa en condicions òptimes per proporcionar robustesa a l'estabilitat de l'embarcació.

S'arriba a concloure que s'ha de continuar estudiant el desenvolupament d'hidroales perquè tenen aplicació activa en esports aquàtics i navegació alhora que s'hauria de trobar solucions per reduir la cavitació.

Com a resultat de l'anàlisi s'assigna el perfil òptim –el perfil Eppler E836– per incorporar a l'embarcació amb les dimensions de les hidroales obtingudes a partir de l'estudi realitzat.



## SUMARI

---

<b>RESUM .....</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI .....</b>	<b>3</b>
<b>1 GLOSSARI .....</b>	<b>5</b>
<b>2 PREFACI .....</b>	<b>7</b>
2.1 Origen del Projecte i Motivació.....	7
2.2 Requeriments previs .....	8
<b>3 INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>9</b>
3.1 Objectius del projecte .....	9
3.2 Abast del projecte .....	10
<b>4 PART TEÒRICA .....</b>	<b>11</b>
4.1 Què són els <i>hydrofoils</i> ? .....	11
4.1.1 Avantatges, inconvenients i limitacions en l'ús d' <i>hydrofoils</i> .....	12
4.1.2 Tipus d' <i>hydrofoil</i> .....	15
4.1.3 Sistemes de propulsió .....	17
4.1.4 Història i evolució .....	18
4.2 Perfils Hidrodinàmics i Criteris de Selecció .....	25
4.2.1 Geometria i paràmetres d'un perfil .....	25
4.2.2 Fenòmens i forces sobre cossos sustentadors .....	27
4.2.3 Altres fenòmens relacionats: la cavitació .....	36
4.2.4 Criteris de selecció .....	42
4.2.5 Procés a seguir per al disseny dels perfils d'una embarcació.....	43
<b>5 PART EXPERIMENTAL .....</b>	<b>45</b>
5.1 Objectius i Metodologia .....	45
5.2 Perfils seleccionats .....	48
5.3 Anàlisi de les Simulacions.....	50

5.3.1	Primera anàlisi.....	50
5.3.2	Primera comparativa de perfils.....	57
5.3.3	Segona anàlisi.....	61
5.3.4	Segona comparativa de perfils i assignació del perfil òptim .....	64
<b>6</b>	<b>PLANIFICACIÓ TEMPORAL I COSTOS .....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>IMPACTE MEDI AMBIENTAL .....</b>	<b>77</b>
	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>79</b>
	<b>AGRAÏMENTS .....</b>	<b>81</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>83</b>
	Referències bibliogràfiques .....	83
	Bibliografia complementària .....	84

## 1 GLOSSARI

---

$\rho$	densitat del fluid de treball
$u$	velocitat relativa entre el fluid i el perfil en el punt considerat
$u_{\infty}$	velocitat del flux lliure, no pertorbat
$\mathcal{L}$	longitud característica (dimensions del model)
$\mu$	viscositat dinàmica del fluid
$\nu$	viscositat cinemàtica del fluid
$p_v$	pressió de vapor del fluid (pressió de cavitació)
$p_{\infty}$	pressió de l'ambient a la zona de flux lliure, no pertorbat
$c$	corda d'un perfil
$b$	envergadura d'un perfil
$AR$	relació d'aspecte
$A_p$	àrea en planta d'una hidroala
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinàmica de Fluids Computacional)



## 2 PREFACI

### 2.1 ORIGEN DEL PROJECTE I MOTIVACIÓ

El meu interès per la vela i la navegació en general va sorgir tan sols fa un any i mig gràcies a la participació a la primera edició del projecte *RC Sailing Challenge* (2013). Aquest projecte culmina en el primer campionat interuniversitari de velers amb radiocontrol i consisteix a dissenyar, crear i construir una embarcació de competició entre un grup reduït d'estudiants.

Des de l'equip del qual jo vaig formar part es va plantejar la possibilitat d'incorporar *hydrofoils* al nostre prototip però, per limitacions de temps, dificultat constructiva i desconeixença sobre el tema, es va desestimar.

La proposta de treball “Els *hydrofoils* i les seves aplicacions” realitzada pel professor Enric Trillas em va motivar molt, ja que em va semblar una oportunitat molt bona per adquirir uns coneixements sobre *hydrofoils* que segurament ens haurien estat útils per al disseny de l'embarcació de radiocontrol, i també em va motivar per les ganes d'aprofundir en el coneixement del que és la física i enginyeria aplicada al món de la nàutica.



Figura 2.1: Embarcació de l'equip A Full Sail, desenvolupada en el període febrer-maig 2013

## 2.2 REQUERIMENTS PREVIS

Per tal de realitzar aquest projecte són necessaris els coneixements de Mecànica de Fluids, assignatura impartida durant el Grau. Conceptes com flux potencial, flux extern, capa límit, sustentació, resistència a l'avanç i cavitació són d'especial importància per poder aprofundir en els fenòmens entorn les superfícies sustentadores.

També són necessaris els coneixements d'altres assignatures com Termodinàmica per a entendre el fenomen de la cavitació, de Projectes per a la bona planificació i organització del treball i la coneixença de quina estructura i continguts ha de tenir, d'Optimització i Simulació per tenir una idea de com seleccionar un perfil òptim i d'Organització i Gestió per al càlcul dels costos del projecte, entre d'altres.



## 3 INTRODUCCIÓ

---

### 3.1 OBJECTIUS DEL PROJECTE

Aquest Treball de Fi de Grau presenta diversos objectius:

- Adquirir coneixements sobre *hydrofoils*: què són, com funcionen, en quines situacions és convenient o no la seva incorporació en embarcacions, de quins tipus n'hi ha i com han anat evolucionant al llarg del temps.
- Aprofundir en els coneixements que s'han donat durant el Grau a Mecànica de Fluids sobre perfils hidrodinàmics i quin és el seu principi físic de funcionament.
- Conèixer més fenòmens que afecten els perfils i el desenvolupament de la sustentació.
- Aprofundir en el coneixement del fenomen de la cavitació que afectarà les hidroales. Tot i ser un fenomen extens i complex que no s'ha treballat a fons en el Grau s'intentarà fer un estudi del fenomen i de com afectarà les hidroales.
- Identificar els diferents criteris de selecció de perfils i aplicar el més adient segons les especificacions de l'embarcació.
- Aprendre com es realitza un procés de selecció de superfícies sustentadores per una embarcació, utilitzant un criteri i identificant de quines fases consta el procés i quins paràmetres s'han de tenir en compte per a l'optimització d'un perfil.
- Simular perfils hidrodinàmics i gestionar la informació obtinguda de manera racional per a l'avaluació i comparació dels perfils.
- Assignar un perfil òptim per les hidroales d'una embarcació en concret.
- Adquirir o consolidar les competències genèriques establertes pel Pla d'Estudis del Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials.

### 3.2 ABAST DEL PROJECTE

Aquest projecte està comprès per una primera part teòrica, on es troba tot el procés de recerca d'informació sobre hidroaules –història, antecedents, usuaris, utilitat, entre d'altres–, sobre els fenòmens que afecten els perfils hidrodinàmics i la seva quantificació i els criteris de selecció.

En certs conceptes com, per exemple, la circulació entorn un cos o el flux potencial, s'ha limitat el grau d'aprofundiment en aquests temes o en càlculs específics d'aquests fenòmens, perquè ja hi ha bibliografia especialitzada per a l'aprofundiment en aquests temes i hi hauria una desviació en el tema d'aquest treball.

La part experimental del projecte comprèn l'elecció de diversos perfils, la seva simulació, anàlisi de dades, elecció del perfil òptim i valoració de les condicions de treball del perfil escollit. Això implica que la construcció d'una hidroaula i la seva simulació experimental no entren dins l'extensió d'aquest treball.

Pel que fa a l'anàlisi de les simulacions, el programari VisualFoil 4.1 limita les dades que es poden obtenir de cada perfil i, per tant, també limita el grau d'aprofundiment en l'elecció del perfil òptim o l'adquisició de dades complementàries. Per exemple, tot i saber que les hidroaules presentaran cavitació, per falta de dades de la distribució de pressions entorn els perfils, l'anàlisi d'aquest fenomen quedarà limitat. Tot i així s'analitzarà el comportament del perfil escollit amb la millor precisió possible.

## 4 PART TEÒRICA

### 4.1 QUÈ SÓN ELS *HYDROFOILS*?

Els *hydrofoils* o hidroales –termes utilitzats indistintament al llarg del treball– són perfils aerodinàmics que s'utilitzen en medis aquàtics. Comparteixen el mateix principi físic que els *airfoils* o perfils d'ala d'avió, en què mitjançant la forma del perfil i un moviment relatiu amb el fluid de l'entorn se n'obté una sustentació desitjada, en aquest cas, per tal d'eleva el casc d'una embarcació respecte l'aigua per reduir-ne el fregament i així poder arribar a unes velocitats més elevades o tenir una millor estabilitat de l'embarcació, entre d'altres (vegeu 4.1.1 Avantatges, inconvenients i limitacions en l'ús d'*hydrofoils*).

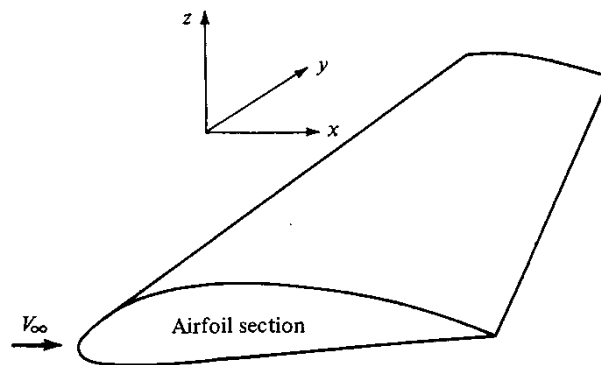


Figura 4.1: Definició d'un perfil aerodinàmic [6]

El principi de funcionament és el següent: a velocitats baixes el casc de l'embarcació es recolza a l'aigua amb normalitat i els *hydrofoils* es troben completament submergits. A mesura que la velocitat augmenta, els *hydrofoils* generen més sustentació. Aquesta sustentació pot arribar a igualar el pes de tot el conjunt de l'embarcació i, com a conseqüència, provocar que el casc s'elevi i quedi totalment fora de l'aigua.

El fet que el casc surti de l'aigua permet augmentar considerablement la velocitat de l'embarcació degut a l'absència de fregament del casc amb l'aigua. D'aquesta manera es fa un millor i més eficient ús de l'energia necessària per moure l'embarcació.

#### 4.1.1 Avantatges, inconvenients i limitacions en l'ús d'*hydrofoils*

Quins són els avantatges de les embarcacions amb perfils sustentadors respecte a altres mitjans de transport marins? En quins casos els *hydrofoils* resulten ser l'elecció més adequada [1]? Hi ha diversos avantatges en la utilització d'aquests elements que permeten complir amb certs requeriments de navegació:

- Quan es requereix una *velocitat relativament elevada* i es necessita mantenir aquesta velocitat eficientment, fins i tot amb onades.

Resulta adequat l'ús d'*hydrofoils* quan la càrrega de l'embarcació no és molt elevada com, per exemple, per embarcacions de fins a 450 passatgers, on els *hydrofoils* són la solució més efectiva respecte a les embarcacions convencionals ja que permeten augmentar la velocitat de 46,3 km/h als 55,56 km/h (de 25 als 30 nusos [2]).

- Quan es necessita que els *moviments de l'embarcació* siguin *mínims* en presència d'onatge, tant per la comoditat dels passatgers com per la tripulació, o per tenir una plataforma estable per als sensors i armes en embarcacions navals (llançaments de míssils). Permet desacoblar totalment o parcialment els moviments de l'embarcació de l'onatge del mar.
- Quan l'*estela d'onades* que deixa l'embarcació ha de ser *mínima* a alta velocitat en zones d'aigües tranquil·les com llacs i alguns rius, per interferir el mínim possible les altres embarcacions i la riba. Les hidroales minimitzen la resistència per fricció i l'energia destinada a la creació d'onades i, per tant, l'estela que deixen és menor.

- Quan es necessita *maniobrabilitat* a alta velocitat per millorar la seguretat i reduir col·lisions en aigües molt freqüentades. A més de l'elevada velocitat a la que poden arribar els *hydrofoils*, els girs realitzats són més còmodes que amb



Figura 4.2: Dues embarcacions militars realitzant girs a alta velocitat [17]

embarcacions convencionals. Per tal de realitzar girs, les embarcacions poden disposar d'un timó convencional que penalitzarà produint més resistència a l'avanç,

o amb un sistema d'*hydrofoils* simètric que modificant l'angle relatiu entre les dues parts podrà generar la guinyada corresponent.

El fet que el casc de l'embarcació deixi d'estar en contacte amb l'aigua parcialment o totalment, aporta molts beneficis en cadena<sup>1</sup>:

- Reducció de la resistència a l'avanç a elevada velocitat
- Necessitat de menys energia de propulsió
- Reducció dels costos del sistema de propulsió<sup>2</sup>
- Augment de la velocitat (fins a un 40%) utilitzant els mateixos mitjans de propulsió
- Reducció del consum de combustible (fins a un 30%)<sup>2</sup>
- Augment de l'autonomia per una mateixa capacitat de combustible<sup>2</sup>
- Reducció de la capacitat de combustible per una mateixa autonomia<sup>2</sup>
- Millora de la qualitat de navegació amb el mar arrissat
- Moviment més suau i amortit
- Reducció de l'estela que deixa l'embarcació
- Reducció de les emissions del motor<sup>2</sup>

D'altra banda, les embarcacions amb *hydrofoils* presenten diversos inconvenients o limitacions com poden ser:

- *Pes de l'embarcació* (actualment hi ha una limitació d'unes 400 tones [3]): encara que s'augmentin les dimensions de l'embarcació, el pes augmenta cúbicament (volum), mentre que la sustentació que donen els *hydrofoils* ho fa quadràticament (la sustentació depèn de la superfície en planta de l'*hydrofoil*).
- *Sustentació i estabilitat*: en presència de fort onatge, si l'*hydrofoil* surt a la superfície fora de l'aigua, l'embarcació en perd, fet que pot provocar que es clavi la proa a l'aigua [4].
- *Manteniment* degut a la complexitat del mecanisme retràtil dels perfils.

---

<sup>1</sup> Dades segons el fabricant d'embarcacions amb *hydrofoils* *Foil Assisted Ship Technologies cc (FASTcc)* [16]

<sup>2</sup> Si l'embarcació té sistema de propulsió per motor

- *Obstacles* que tant poden impedir el correcte funcionament dels perfils –algues, troncs, males herbes– com el correcte moviment de l'embarcació per certes zones de poca profunditat –entrada al port, bancs de sorra, aigües poc profundes, costes on amarrar l'embarcació.
- *Problemes a elevades velocitats*: cavitació (vegeu 4.2.3) i ventilació<sup>3</sup>. Ambdós fenòmens suposen un augment de la resistència a l'avanç.
- *Potència de propulsió molt elevada* és necessària per arribar a l'estat en què l'embarcació planeja o vola.

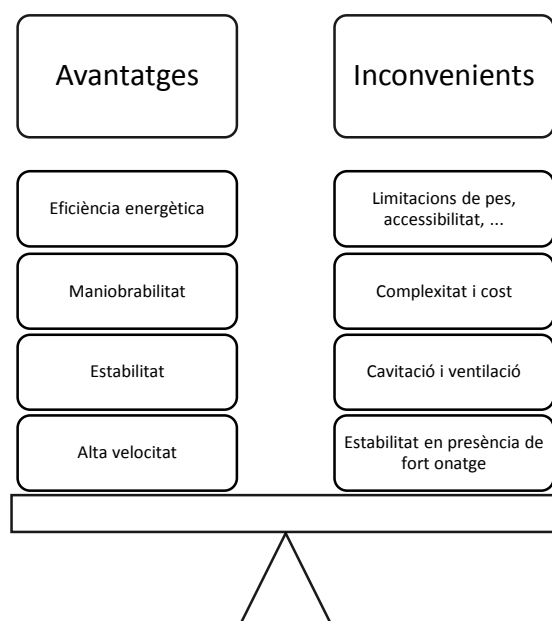


Figura 4.3: Balanç d'avantatges i inconvenients en l'ús d'hydrofoils

Fent un balanç dels pros i contres en l'ús de perfils, arribem a la conclusió que s'ha de decidir per a cada embarcació en concret quines són les seves condicions de treball, quines són les especificacions a complir i així valorar si fa una aportació positiva o no la incorporació d'aquests apèndixs.

<sup>3</sup> Fenomen que es dona quan part de l'*hydrofoil* travessa la superfície de l'aigua i l'aire és succionat fins la superfície inferior del perfil. Com que l'aire és molt menys dens que l'aigua, el perfil perd la sustentació que permetia elevar el casc de l'embarcació.

#### 4.1.2 Tipus d'*hydrofoil*

Principalment hi ha dos tipus d'*hydrofoil*: els que tallen la superfície del fluid i els que estan completament submergits.

- *Tallants de superfície (surface-piercing)*

Tenen part dels perfils dissenyats per anar per l'aire i part per anar per l'aigua. Uns braços connecten els *hydrofoils* al casc de l'embarcació per mantenir-lo a una certa alçada per sobre la superfície de l'aigua quan s'està anant a la velocitat d'operació del perfil. Quan s'accelera es produeix sustentació a la part submergida del perfil i dels braços i s'eleva el casc fins el punt en què només queda submergida l'àrea necessària per contrarestar el pes de l'embarcació.

Aquest sistema és autoestabilitzant del balanceig (rotació entorn l'eix longitudinal) i capcineig (rotació entorn l'eix transversal) de l'embarcació, tal com s'acaba d'explicar per les acceleracions, però també ho és pels girs, ja que si l'embarcació

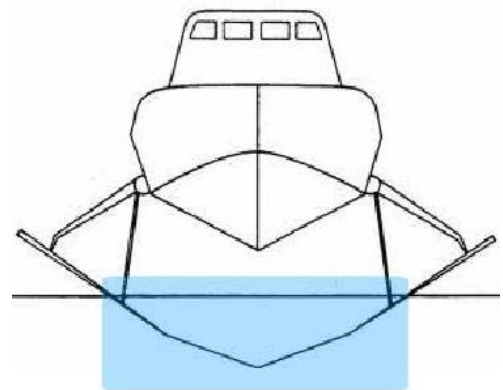


Figura 4.4: Embarcació amb *hydrofoils* que tallen la superfície [17]

s'inclinés massa cap a un cantó, més superfície d'*hydrofoil* entraria en contacte amb l'aigua per aquella banda i, per tant, es generaria més sustentació cap al cantó oposat que contrarestarria aquest excés d'inclinació recuperant la posició inicial.

- *Completament submergits*

Aquests treballen en tot moment sota el nivell de l'aigua. Els braços que els sostenen acostumen a ser verticals i no contribueixen a donar sustentació a l'embarcació.

El sistema no és autoestabilitzant i, per tant, es necessita un sistema de control automàtic per mantenir el rumb i l'alçada de "vol" de l'embarcació (compta amb un sensor de nivell de l'aigua). Aquest

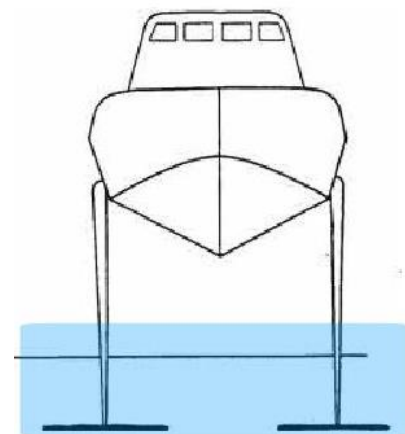


Figura 4.5: Embarcació amb *hydrofoils* completament submergits [17]

sistema de control s'encarrega d'ajustar constantment l'angle del perfil tant ajustant l'angle d'atac com modificant l'angle del flap (si és que en disposa), com es pot veure a la figura 4.6.

El fet de poder modificar l'angle del perfil ens permet mantenir el casc a una certa alçada i navegar amb una eficiència elevada on es té una resistència a l'avanç mínima per uns certs valors de sustentació. Normalment els perfils estan dissenyats per operar en un rang de valors d'angles d'atac reduïts.

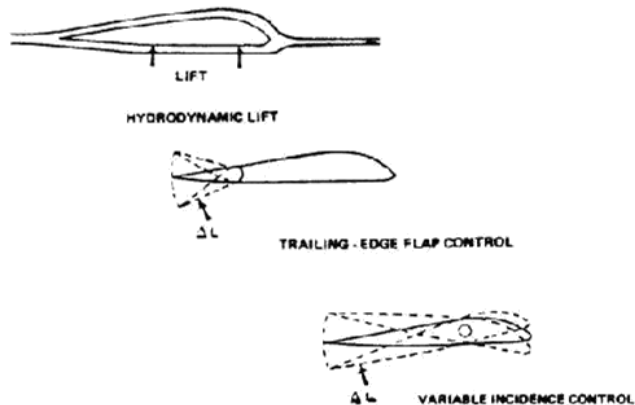


Figura 4.6: Control de la sustentació que dona el perfil mitjançant la variació del seu angle [17]

El punt a favor que té aquest tipus d'*hydrofoils* és que permeten desacoblar el casc de l'embarcació de la superfície del mar i de l'efecte de les onades. Veurem més endavant que l'inconvenient que tenen és la complexitat del sistema de propulsió i, per tant, el cost d'aquest sistema.

Els principals modes en què una embarcació *hydrofoil* pot funcionar són els mostrats a la figura 4.7. En el primer mode de navegació, l'embarcació "vola" a una certa alçada per sobre del nivell mig del mar. El sistema de control procura que hi hagi el mínim moviment a l'embarcació. El límit de funcionament d'aquest mode depèn de l'alçada de les onades. Mentre els braços que

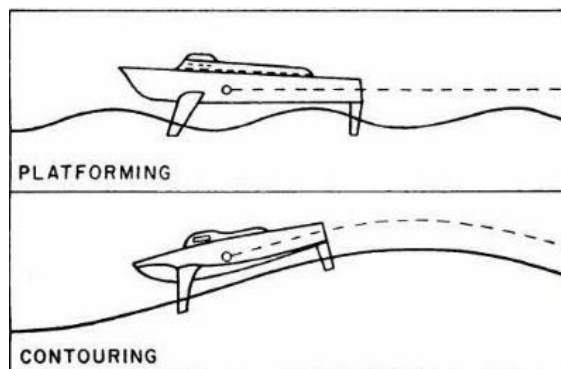


Figura 4.7: Modes principals de navegació en *hydrofoils* [17]

subjecten els perfils siguin més alts que les onades, es podrà operar en aquest mode. Si les onades n'excedeixen l'alçada, es passarà al segon mode, on es va contornejant paral·lelament el perfil de les onades.



Pel que fa a la disposició dels *hydrofoils*, també hi ha establerta una classificació (figura 4.8):

- *Convencional*: els perfils anteriors són en proporció més grans que els posteriors.
- *Canard*: els perfils posteriors són en proporció més grans que els anteriors.
- *Tàndem*: els perfils estan repartits equitativament entre la part anterior i la posterior. És un tipus de disposició útil per a grans embarcacions on es vol evitar que l'envergadura dels perfils sigui excessiva.

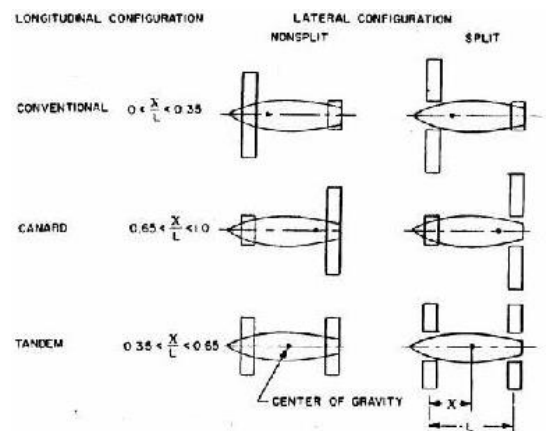


Figura 4.8: Opcions de disposició dels *hydrofoils* [17]

#### 4.1.3 Sistemes de propulsió

Hi ha una gran varietat de sistemes de propulsió que s'han utilitzat.

Pels *hydrofoils* que tallen la superfície del mar, el sistema de propulsió típic utilitzat en els últims quaranta anys és un *motor dièsel* que mitjançant una caixa de canvis connecta un eix amb l'hèlix de l'embarcació.

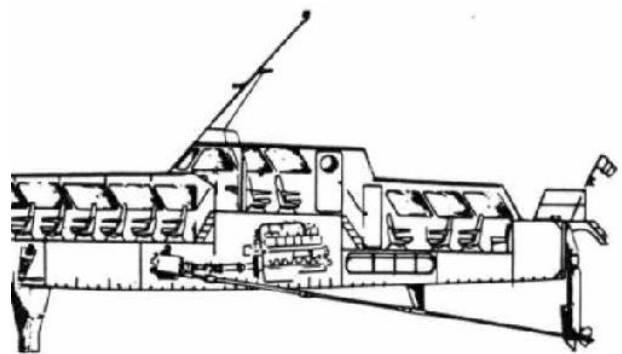


Figura 4.9: Propulsió mitjançant hèlixs en *hydrofoils* que tallen la superfície de l'aigua [1]

Pels *hydrofoils* completament submergits s'utilitza un sistema més complex i més car, però pot ser més eficient. A partir d'una *turbina de gas*, el sistema de propulsió—eix, caixa de canvis— es troba dins el braç que subjecta l'*hydrofoil* fins arribar a l'hèlix.

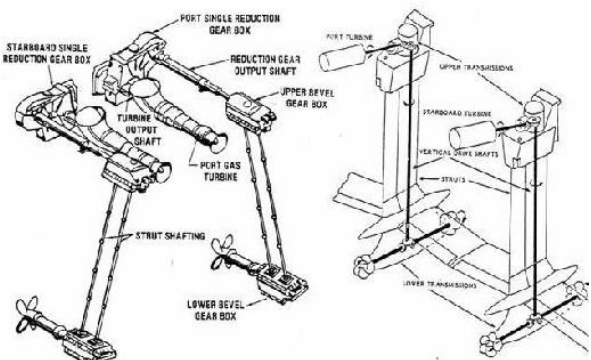


Figura 4.10: Propulsió mitjançant hèlixs en *hydrofoils* completament submergits [1]

Una alternativa a la propulsió per mitjà d'hèlixs són els hidrojets. Aquest mètode es fonamenta en la tercera llei de Newton o principi d'acció-reacció en què mitjançant una tovera s'aconsegueix que un raig d'aigua surti a alta velocitat i la reacció consegüent genera propulsió a l'embarcació. Un dels avantatges que presenta és que el sistema de propulsió per si sol no té apèndixs dins l'aigua, fet que redueix el fregament.

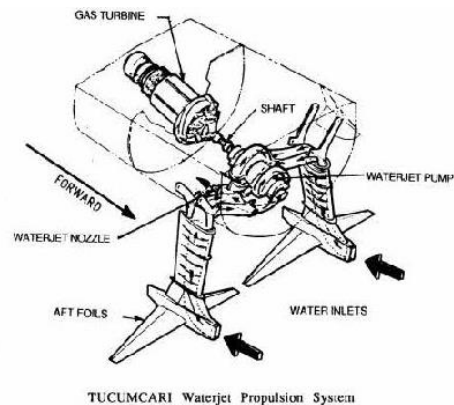


Figura 4.11: Propulsió mitjançant hidrojet [1]

Tant el sistema de propulsió amb hèlixs com per hidrojets tenen els seus avantatges i inconvenients, que s'han de valorar en funció de les especificacions de cada embarcació i que s'han de tenir en compte durant l'estudi preliminar i de viabilitat del projecte.

També hi ha embarcacions que disposen d'*hydrofoils* que són propulsats únicament pel vent mitjançant l'ús de veles.

#### 4.1.4 Història i evolució

Els *hydrofoils* han esdevingut populars al llarg del temps. S'han utilitzat en diversos tipus de transport marítim, des d'aplicacions militars fins a esports aquàtics. A continuació farem un breu repàs a la història dels *hydrofoils* des dels seus orígens fins a l'actualitat i veurem l'evolució d'aquests objectes i els usos que se'ls ha donat al llarg del temps.

La primera evidència d'ús d'hidroales en una embarcació es troba en una patent britànica que data del 1869. Va ser concebuda pel parisenc Emmanuel Denis Farcot, que va afirmar que "adaptant als laterals i a la part inferior de la embarcació un seguit de plans inclinats o unes peces en forma de cunya, s'aconseguiria que a mesura que avancés l'embarcació, aquesta s'elevaria i reduiria el seu calat".

L'inventor italià Enrico Forlanini va començar a treballar amb hidroales l'any 1898, i va fer servir un sistema d'hidroales en escala. Va obtenir patents a Gran Bretanya i Estats Units pels seus dissenys.

Però no va ser fins el 1906, quan un article publicat al número de març de la revista *Scientific American* escrit per William E. Meacham, pioner americà en hidroales, exposava els principis bàsics d'aquestes embarcacions. Va ser llavors quan Alexander Graham Bell va considerar que la invenció d'"hidroplans" seria un gran assoliment.

Després de llegir l'article de Meacham, Bell va començar a esbossar els conceptes del que actualment es coneix com hidroala. Juntament amb Casey Baldwin, l'estiu del 1908 van començar els assajos. Baldwin va estudiar els treballs de l'inventor italià Enrico Forlanini i va començar a fer proves basades en els seus models, cosa que li va permetre juntament amb Bell desenvolupar la hidroala. Durant la gira mundial de Bell entre 1910 i 1911, ell i Baldwin es van trobar amb Forlanini a Itàlia. Aquesta trobada els va permetre navegar pel llac Maggiore amb la hidroala de Forlanini.

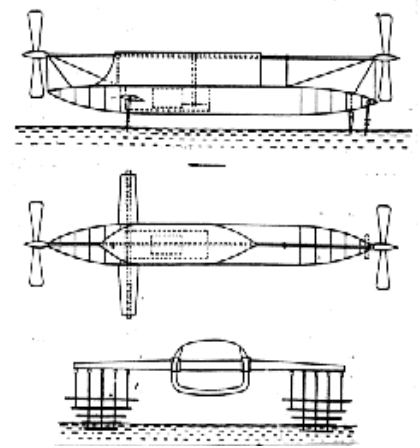


Figura 4.12: Dissenys sobre paper de les hidroales disposades en escala de Forlanini



Figura 4.14: Hidroala de Forlanini sobre el llac Maggiore l'any 1910

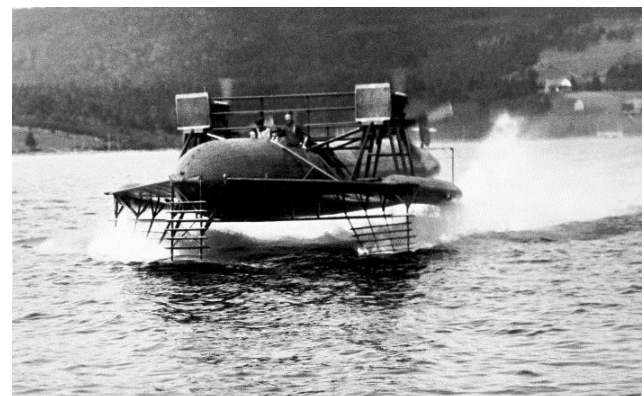


Figura 4.13: Model HD-4 d'Alexander Graham Bell

De tornada a Baddeck, a Nova Escòcia, es van assajar diversos prototips fins a arribar al disseny de l'HD-4. Utilitzant motors Renault es va assolir una velocitat màxima de 87 km/h, amb una ràpida acceleració, superant les onades sense dificultats i aconseguint una gran governabilitat i estabilitat. L'informe de Bell a la Marina dels Estats Units li va permetre obtenir dos motors de 260 kW. El 9 de setembre del 1919 l'HD-4 va establir un rècord

mundial de velocitat sobre l'aigua de 114 km/h que no es va veure sobrepassat durant 10 anys.

Durant la dècada dels 50, una parella britànica va construir una embarcació amb hidroales anomenada *White Hawk* propulsada per hidrojets (vegeu 4.1.3 Sistemes de propulsió) per intentar batre el rècord absolut de velocitat en medi aquàtic però els testos no van arribar a la marca de l'HD-4 de Bell. Els dissenyadors van topiar amb un fenomen que encara ara limita la velocitat màxima d'aquestes embarcacions: la cavitació (vegeu 4.2.3).

Entre 1873 i 1914, el dissenyador naval britànic John I Thornycroft va treballar en una sèrie de models basats en un casc inclinat i una única ala inclinada. El 1909 la seva companyia va construir una embarcació de 7,30 m d'eslora, el *Miranda III*, propulsat per un motor de 45 kW (60 cv). El model que el va succeir, el *Miranda IV*, va arribar a 65 km/h (35 nusos).

A Alemanya, el baró von Schertel va treballar en el camp de les hidroales en els anys previs i durant la Segona Guerra Mundial. Després de la guerra, l'equip tècnic de Schertel va ser capturat pels soviètics. Schertel es va traslladar a Suïssa, on va formar la companyia Supramar A.G.. El 1952 Supramar va construir el primer hidroala comercial, anomenat PT10, construït per operar al Llac Maggiore entre Suïssa i Itàlia. El PT10 era del tipus *surface-piercing* (vegeu 4.1.2 Tipus d'*hydrofoil*) i era capaç de transportar 32 passatgers a una velocitat de 65 km/h (35 nusos). El 1968, l'empresari Hussain Najadi va comprar Supramar A.G. i va expandir el seu mercat fins el Japó, Hong Kong, Singapur, Noruega, el Regne Unit i els Estats Units. La companyia nord-americana General Dynamics es va convertir en empresa amb dret d'explotació dels productes de Supramar i El Pentàgon va premiar el seu primer projecte d'investigació i desenvolupament en el camp de la supercavitació. La Hitachi Shipbuilding d'Osaka (Japó), va ser una altra empresa amb permisos d'explotació donats per Supramar així com moltes altres empreses navals i drassanes dels països de la OCDE (Organització per a la Cooperació i el Desenvolupament Econòmic).



Entre el 1952 i el 1971, Supramar va seguir dissenyant models d'hidroala: els PT20, PT50, PT75, PT100 i PT150. Amb l'excepció del PT150, tots eren del tipus *surface-piercing*. Es van construir més de 200 unitats dels models de Supramar, la majoria d'ells per Leopoldo Rodriquez a Itàlia.



Figura 4.15: Embarcació PT150

A finals de la dècada de 1960 la Marina Canadenca va construir i provar una embarcació hidroala d'alta velocitat destinada a la lluita antisubmarina, el HMCS Bras d'Or (FHE 400), però el projecte va ser abandonat degut a un canvi en les prioritats estratègiques dels alts càrrecs de la Marina. El Bras d'Or era del tipus *surface-piercing* i durant les proves va mostrar un molt bon comportament i va arribar a una velocitat màxima de 117 km/h (63 nusos).



Figura 4.17: Embarcació Bras d' Or

La Unió Soviètica també va experimentar amb hidroales, construint models per a la navegació fluvial durant les dècades del 1970 i 1980.



Figura 4.16: Embarcació de classe Raketa

Alguns exemples d'aquestes hidroales són les embarcacions de la classe Raketa i la seva successora la Meteor que era una mica més gran, o el més petit de la classe Voskhod, dissenyats a l'Oficina d'Estudis Especials (OKB)-Alexeiev, liderada per l'enginyer Rotislav Alexeiev creador de l'ekranopla, un tipus d'aeronau que es serveix de l'efecte terra per volar.

Els *usos* que s'han donat a les hidroales són diversos. Com a usos civils destaquen les embarcacions de transport de passatgers en aigües relativament tranquil·les –com rius i llacs– en què es necessita poca elevació per sobre el nivell de l'aigua. A Espanya es va fer servir a l'estret de Gibraltar però degut als forts vents i a l'aparició d'embarcacions més estables i de més cabuda com els catamarans, l'ús d'hidroales a l'estret es va suspendre. A Itàlia hi ha flotes que operen a Campània i Sicília realitzant enllaços entre varies illes. També n'hi ha a la Xina i a Rússia, on són un important mitjà de transport en llacs i grans rius navegables.



Figura 4.18: Boeing 929 [18]

Una de les embarcacions amb hidroales que va tenir més èxit és la Voskhod, desenvolupada per la Unió Soviètica i fabricada a Rússia i Ucraïna. Actualment en funcionen a més de 20 països. El model més recent és el Voskhod-2M FFF, popularment conegut com Eurofoil per operar en transport públic a Holanda.

Per altra banda, el Boeing 929 (figura 4.18) és molt utilitzat a Àsia també per transport de passatgers entre diverses illes de Japó, la Xina i la península de Korea.

Degut a la seva alta velocitat i bona maniobrabilitat, els hidroales han tingut també un ús militar, ja que és un objectiu difícil per torpedes i míssils. D'aquesta manera, s'han utilitzat com a llanxes patrulla a la costa o també com a base de llançament d'aquests míssils. Per exemple, la Marina Militar d'Estats Units va utilitzar hidroales de



Figura 4.19: Primera formació de l'esquadra PHM volant. Florida, 1983 [17]

combat de la classe Pegasus, entre 1977 i 1993, presentant una gran rapidesa i gran armament que els feia molt eficaços. Així mateix, la Marina Militar Italiana entre els anys 1977 i 1984 va utilitzar hidroales amb grans prestacions, però per la seva poca robustesa en mala mar també es van deixar d'utilitzar.

Un dels usos més actuals i en el que s'està experimentant és en l'àmbit dels esports i la navegació.

Un clar exemple és l'Hydroptère, el trimarà més ràpid del món. Dotat d'hidroales, després de 25 anys d'investigació i enginyeria –el primer model data del 1975– combinant alta tecnologia de les indústries



Figura 4.20: L'Hydroptère navegant a San Francisco amb els seus perfils a 45°, 2012 [5]

aeronàutica i marina, aquest model pot “volar” pels oceans a alta velocitat. És capaç de passar dels 37 als 83 km/h en 10 segons. Ha superat molts rècords de velocitat, arribant puntualment als 104 km/h (56,3 nusos) i aconseguit mantenir una velocitat d'uns 95 km/h sobrepasant la velocitat del vent que el propulsa [5].

Un altre model important és l'AC72, un catamarà dotat d'hidroales mitjançant el qual es va competir a la 34ena edició de l'*America's Cup*. La velocitat màxima enregistrada en cursa és d'uns 88 km/h, sobrepasant la velocitat del vent 2,2 vegades (vent a 40 km/h).



Figura 4.21: Catamarà AC72 durant la 34ena edició de l'*America's Cup* a San Francisco. Es pot observar en detall una de les hidroales fora de l'aigua. [19]

Altres models a destacar són el trimarà *Windrider Rave* –un hidroala biplaça–, el *foilboard* –una planxa de surf que incorpora hidroales– i el Flyak –un caiac adaptat amb hidroales que arriba a uns 27 km/h elevant-se uns 15 cm per sobre el nivell de l'aigua, entre d'altres.



Figura 4.22: D'esquerra a dreta, una *foilboard* i un *flyak*



## 4.2 PERFILS HIDRODINÀMICS I CRITERIS DE SELECCIÓ

En aquesta secció s'expliquen els perfils hidrodinàmics, la seva geometria, les seves característiques i els paràmetres a tenir en compte per a la selecció d'un perfil.

### 4.2.1 Geometria i paràmetres d'un perfil

A continuació tenim les figures 4.23 i 4.24 que ens mostren els principals paràmetres d'un perfil.

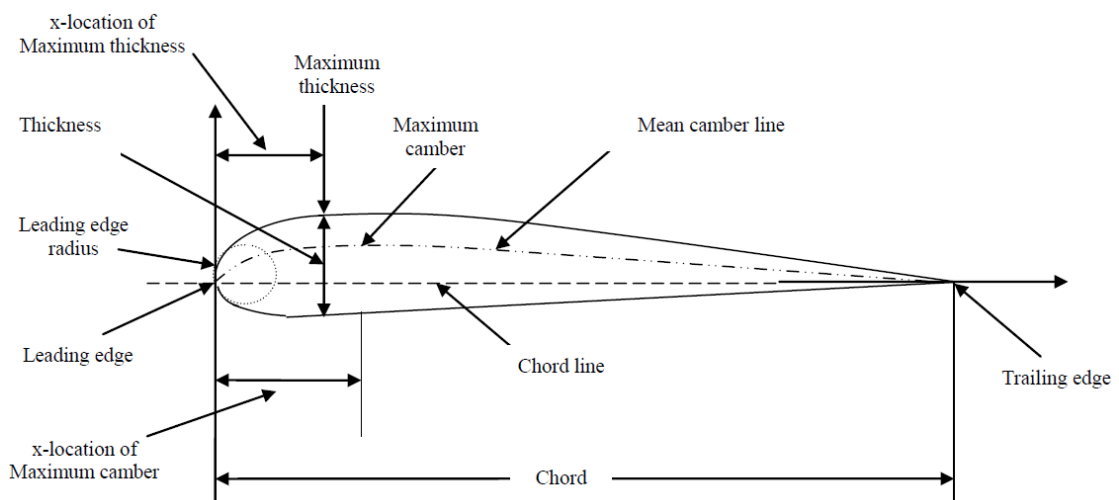


Figura 4.24: Paràmetres geomètrics d'un perfil d'ala [8]

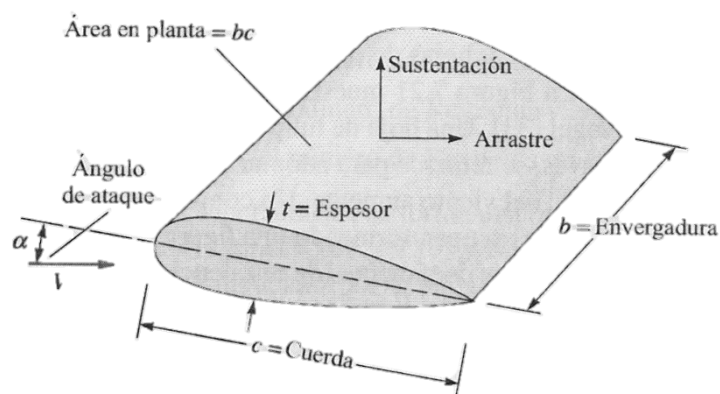


Figura 4.23: Paràmetres geomètrics d'un perfil d'ala [9]

L'*extradós* i l'*intradós* són les superfícies superior i inferior del perfil, respectivament. La distància entre ambdues cares és el *gruix* ( $t$ ).

L'amplada de la hidroala o profunditat de la secció s'anomena *envergadura* ( $b$ ).

La *corda* ( $c$ ) és la distància entre el caire d'atac i el caire de sortida. El *caire d'atac* és la part que entra primer en contacte amb el fluid, la part frontal. El *caire de sortida* és la vora posterior de l'ala, on conflueixen els fluxos d'intradós i extradós.

L'àrea en planta correspon a l'àrea que ocupa la hidroala vista des de dalt.

$$A_p = b \cdot c \quad (\text{Equació 4.1})$$

Altres paràmetres importants són el màxim gruix del perfil, el radi de curvatura del caire d'atac, la línia mitja del perfil (per perfils asimètrics) o el punt de màxima curvatura.

L'angle entre el corrent no pertorbat del fluid i la *corda* del perfil és l'*angle d'atac*  $\alpha$  o angle d'incidència. S'explica a continuació quins són els efectes de l'angle d'atac.

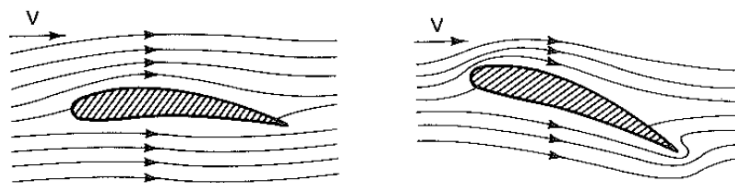


Figura 4.26: Flux entorn un perfil per un angle d'atac petit i un de gran, respectivament

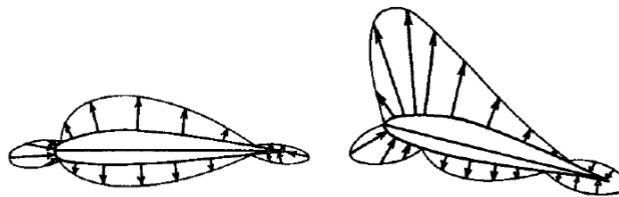


Figura 4.25: Distribució de pressions entorn un perfil per un angle d'atac petit i un de gran, respectivament

Com es veurà més endavant, la sustentació es pot optimitzar orientant el perfil amb un cert angle d'atac. Generalment, per angles d'atac petits, la sustentació augmenta ràpidament, mentre que la resistència a l'avanç ho fa més lentament. La màxima sustentació s'obté aproximadament per uns angles d'entre 10-15°. Es pot observar a la figura 4.26 com augmentant l'angle d'atac, les línies de corrent a l'extradós estan més juntes i, per tant, hi ha més velocitat i menys pressió. També es pot observar com es desplacen els punts d'estancament i de separació del flux. També es veurà a les simulacions experimentals, que els punts de transició de capa límit laminar a turbulenta es desplacen, avançant-ne la transició a l'extradós quan s'augmenta l'angle d'atac.

A la figura 4.25 es pot observar com augmentant l'angle d'atac, la distribució de pressions es veu modificada i augmenta així la sustentació del perfil.

#### 4.2.2 Fenòmens i forces sobre cossos sustentadors

Com en qualsevol sòlid en moviment relatiu amb un fluid, les línies de corrent del fluid contornegen l'obstacle per continuar el seu moviment, com es veu a la figura 4.27, pel cas ideal de flux no viscos. Però, tal i com es va estudiar a Mecànica de Fluids, els fluxos reals són tots fluxos viscosos i presenten fenòmens de transport, com difusió de la massa, viscositat (fricció) i conducció tèrmica –també estudiat a Termodinàmica.

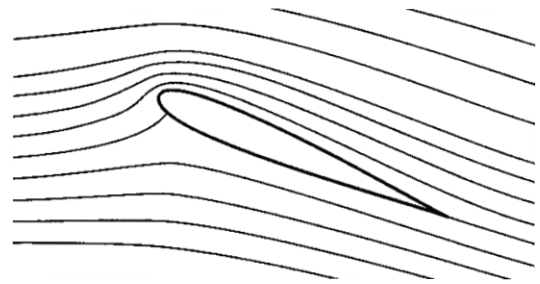


Figura 4.27: Línies de corrent, obtingudes analíticament, del flux potencial no viscos al voltant d'un perfil simètric amb angle d'atac

Els fluxos no viscosos teòricament es donen per valors del nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot u_{\infty} \cdot L}{\mu} = \frac{u_{\infty} \cdot L}{\nu} \quad (\text{Equació 4.2})$$

que tendeixen a infinit. Tot i així, per casos amb valors de Reynolds molt elevats però finits, es pot assumir un flux no viscos. Per aquests casos, la influència de la fricció i els altres fenòmens comentats es donen en una regió adjacent a la superfície del cos, anomenada *capa límit* i la resta del flux extern al cos és considerat no viscos. La divisió del flux en les dues regions comentades es pot observar a la figura 4.28.

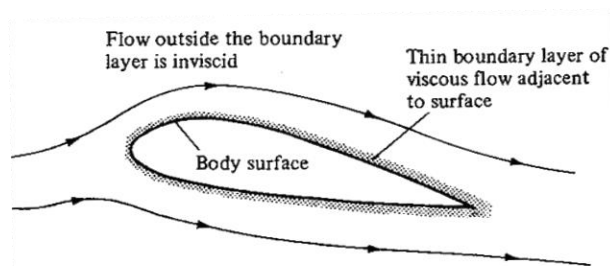


Figura 4.28: Divisió del flux en dues regions: (1) la viscosa i estreta capa límit en contacte amb la superfície del cos i (2) el flux no viscos fora de la capa límit [6]

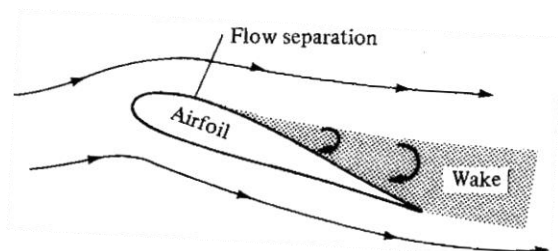


Figura 4.29: Flux dominat per la viscositat [6]

En cossos prims com és el cas d'una ala, el model no viscos fa una bona predicció de la distribució de pressions i la sustentació del cos, i també dona una bona representació de les línies de corrent i del flux un cop passat el cos.

Tot i així, com que la fricció —esforços tallants— són la major font de resistència a l'avanç per un perfil prim amb angle d'atac petit, les teories no viscoses no poden fer una predicció adequada de tota la força de resistència a l'avanç [6], ja que només tenen en compte la resistència a l'avanç deguda a la forma del cos.

D'altra banda, hi ha casos com el de la figura 4.29 en què els fluxos són clarament dominats pels efectes de la viscositat, com el cas d'un perfil amb elevat angle d'incidència, fet que afavoreix la separació de la capa límit a la superfície superior i es forma una gran estela aigües avall. Aquest tipus de flux és típic també en cossos roms com, per exemple, els cilindres. En aquest cas, cap teoria no viscosa per si sola pot fer la predicció dels corresponents fluxos.

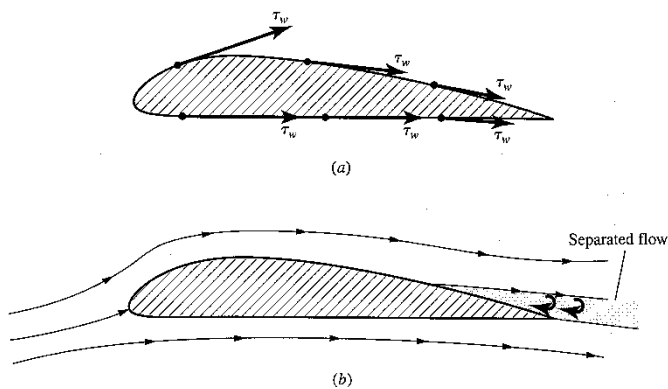


Figura 4.31: Dos components de la resistència a l'avanç a un perfil: (a) tensions tallants a la superfície i (b) gradient de pressió advers degut a la separació del flux [6]

Per tant, hi ha dues fonts de resistència a l'avanç que provenen de la mateixa causa, la viscositat, tal com es pot observar a la figura 4.30:

(a) la *resistència deguda a la fricció del fluid amb la superfície*, i (b) un *gradient de pressions advers degut a la separació del flux*, usualment conegut com resistència de forma, que augmenta les pressions a

l'extradós [6].

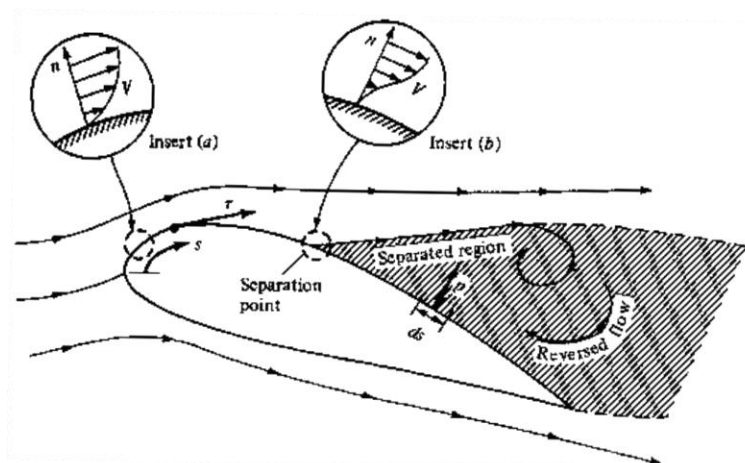


Figura 4.30: Efecte de la viscositat sobre un cos en moviment relatiu respecte un fluid: esforços tallants i separació de la capa límit

La resistència a l'avanç per fricció és deguda a la capa límit, que és la zona que conté els elevats gradients de velocitat entre la superfície del cos ( $y=0$ ) on la velocitat és nul·la –condició de no lliscament– i la velocitat del flux extern (vegeu els gradients de velocitat a la figura 4.31). Per això hi ha presència de tensions tallants elevades a la superfície.

$$\tau = \mu(dV/dy)_{y=0} \quad (\text{Equació 4.3})$$

Per tant, com a idea general, com més tardin a separar-se aquestes línies de corrent del cos, més petita és l'estela que deixa el sòlid i també, en conseqüència, la resistència a l'avanç del sòlid. És per això que s'utilitzen *formes aerodinàmiques* –sòlids de proa arrodonida i popa allargada i aguda– per evitar el desprendiment de les línies de corrent i així també disminuir el gradient de pressió advers [7].

L'acció del fluid sobre el perfil es manifesta en forma de *forces de resistència a l'avanç* (D) com s'acaba de comentar, i *forces de sustentació* (L), que són aplicades al centre de pressió del perfil. La posició del centre de pressió depèn de la velocitat i de l'angle d'atac –es desplaça cap al caire d'atac quan s'augmenta aquest angle [8]. Si volem desplaçar aquestes forces respecte el centre de pressions, es generarà un moment de capcineig (M) resultant. Existeix un punt pel qual els moments resultants són independents de l'angle d'atac i per això és tan important desplaçar les forces fins a aquest punt: el centre aerodinàmic (figura 4.32). Aquest punt es troba a la quarta part de la longitud de la corda respecte el caire d'atac.

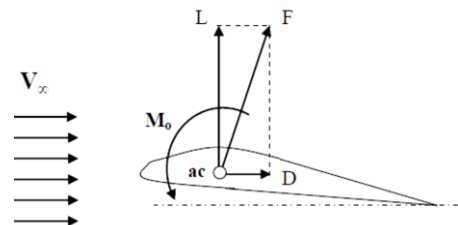


Figura 4.32: Sustentació, resistència a l'avanç i moments respecte el centre aerodinàmic [8]

La funció primària del perfil és generar una força de sustentació suficient o Lift (L). Si aquesta força és superior al pes del cos, aquest experimentarà un moviment ascensional. Per tant, aquest serà un paràmetre molt important, però no necessàriament el paràmetre a maximitzar –tal i com es veurà a l'apartat de criteris de selecció.

Els coeficients adimensionals derivats d'aquestes forces i del moment estan definits respecte a l'àrea en planta  $A_p$  i són, respectivament, el coeficient de sustentació  $C_L$ , el coeficient de resistència a l'avanç  $C_D$ , i el coeficient de moment de capcineig  $C_M$ .

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho u^2 A_P} \quad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho u^2 A_P} \quad C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho u^2 A_P c} \quad (\text{Equacions 4.4, 4.5 i 4.6})$$

Aquests coeficients varien amb l'angle d'atac  $\alpha$  i amb el nombre de Reynolds (equació 4.2) on la longitud característica  $\mathcal{L}$  per a un perfil correspon a la seva corda  $\mathcal{L} = c$  [9].

Els coeficients  $C_L$  i  $C_D$  són importants per quantificar el comportament del perfil i el que se n'obté. Per tal de poder relacionar les forces de sustentació ( $L$ ) i de resistència a l'avanç ( $D$ ) es defineix el *rendiment aerodinàmic* d'un perfil

$$\beta = \frac{C_L}{C_D} \quad (\text{Equació 4.7})$$

que depèn de la forma de l'*hydrofoil* i que és usualment un paràmetre a optimitzar.

. En aquest sentit, les gràfiques  $\beta - \alpha$  són molt útils per a la selecció de perfils. D'aquesta manera es pot analitzar si un perfil proporciona una sustentació elevada amb una resistència a l'avanç relativament baixa, i si ho fa amb una certa estabilitat per a un rang de valors d'angle d'atac raonable.

El cicle de funcionament d'una hidroala comprèn varies etapes –arrencada, elevació, creuer, girs, ... – però l'estat principal i pel que el perfil és optimitzat és en creuer. Per tant, en creuer la força de sustentació ( $L$ ) és igual al pes total ( $W$ ) o parcial de l'embarcació i la resistència a l'avanç ( $D$ ) és igual a l'empenta o força de propulsió corresponent ( $T$ ).

$$L = W \rightarrow \frac{1}{2}\rho V^2 A_P C_L = p \cdot mg$$

$$D = T \rightarrow \frac{1}{2}\rho V^2 A_P C_D = n \cdot T_{m\grave{a}x}$$

Equacions 4.8 i 4.9

on  $p$  és el tant per u del pes de l'embarcació que es vol compensar amb la sustentació que donen les hidroales –si es desitja tenir tot el casc de l'embarcació fora de l'aigua,  $p = 1$ – i  $n$  –factor comprès entre 0,6 i 0,9– indica que no s'està utilitzant la potència màxima de la propulsió, ja que aquesta només s'utilitza per a l'arrencada i per navegar a màxima velocitat.

Si es disposa d'un element propulsor que generi una força superior a la de resistència, el sòlid es podrà desplaçar en sentit oposat a la velocitat relativa del fluid.

Una hidroala és considerada com una superfície sustentadora. Aquesta sustentació prové de la diferència de pressions entre l'intradós i l'extradós del perfil, provinent de la dinàmica del fluid entorn seu on a la figura 4.27 s'ha observat que a la part superior les línies de corrent s'ajunten més (elevada velocitat, baixa pressió) i a la part inferior passa just el contrari. Però aquesta teoria només considera un flux potencial entorn el perfil, irrotacional i no viscos, fet que no el fa completament representatiu dels fenòmens que es desenvolupen, ja que prop de la superfície del perfil es troba la capa límit, fonamentada precisament en la viscositat.

Per tant, la sustentació d'un perfil prové de la *diferència de pressions a les superfícies del perfil* i també de les *tensions tangencials* a la superfície. Aquestes últimes gairebé no tenen efecte directe sobre la sustentació, ja que aporten un component horitzontal i, per tant, podríem pensar que són negligibles per a la generació de sustentació. Però en un flux únicament no viscos la sustentació no seria possible, ja que no hi hauria cap mecanisme físic possible per assolir la condició de Kutta en què s'abandona el caire de sortida d'una manera suau. La manera mitjançant la qual s'assoleix aquesta condició és mitjançant la capa límit, és a dir, mitjançant la fricció. Per tant, tot i que la sustentació és deguda a la diferència de pressions entre les superfícies inferior i superior –un fenomen no viscos–, no existiria en un entorn sense fricció [6].

La sustentació també depèn d'altres fenòmens. Per obtenir la solució teòrica s'ha d'utilitzar la condició de Kutta que imposa que el flux al caire de sortida ha de ser suau i paral·lel a la línia de corda.

El procés d'evolució del flux al voltant d'un perfil (figura 4.34) és fonamental per entendre els altres fenòmens que contribueixen al fenomen de la sustentació. Just en arrancar el moviment (a) el flux és irrotacional i no viscos (flux

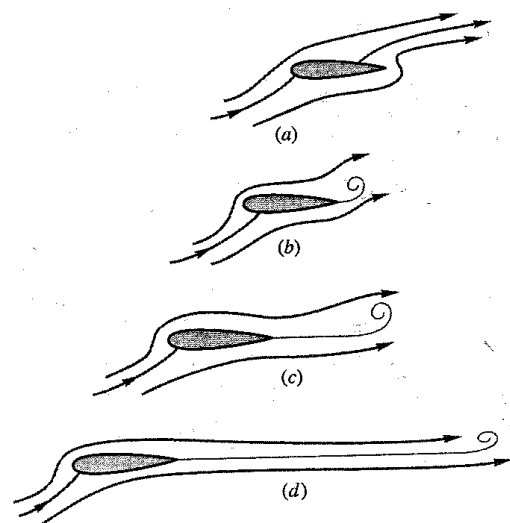


Figura 4.33: Etapes successives del desenvolupament de la sustentació

potencial). El punt d'estancament està sobre l'extradós i no hi ha sustentació. El flux en no ser capaç de vorejar el caire de sortida punxegut, afavoreix la separació i es crea un remolí d'arrencada (b) que és arrossegat aigües avall (c i d) i fa que augmenti la sustentació. El punt d'estancament es va desplaçant sobre l'extradós cap al caire de sortida, fins a tenir unes línies de corrent que surten aproximadament paral·leles a la corda. En aquesta situació, la sustentació ja s'ha desenvolupat completament [9].

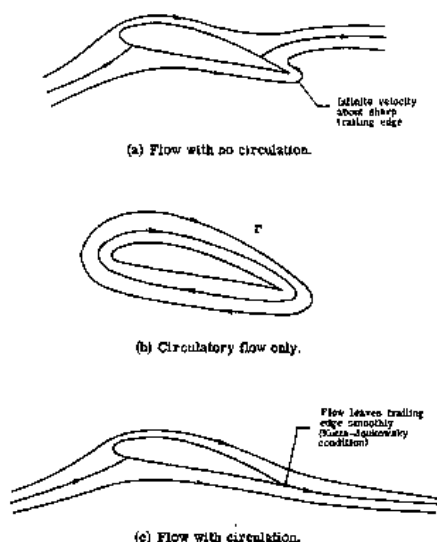


Figura 4.34: Efecte de la circulació en un perfil amb el corresponent desplaçament del punt d'estancament a la superfície superior [6]

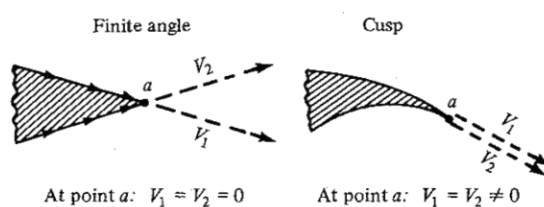


Figura 4.35: Diferents formes del caire de sortida i la seva relació amb la condició de Kutta [6]

D'aquest desenvolupament del flux se'n dedueix que existeix una única circulació  $\Gamma_{\text{Kutta}}$  entorn el perfil –que depèn de la seva forma, angle d'atac i velocitat d'incidència [9]– que desplaça el punt d'estancament posterior fins al caire de sortida per tal que el flux tingui una sortida del perfil suau. Aquest teorema és conegut com el teorema o *condició de Kutta*. A la figura 4.33 es pot observar, d'entre els possibles infinits valors de circulació entorn el perfil, un primer cas on es té una circulació inferior a la necessària per tal que hi hagi sustentació ( $\Gamma < \Gamma_{\text{Kutta}}$ ) i en segon lloc un perfil amb la circulació que compleix la condició de Kutta ( $\Gamma = \Gamma_{\text{Kutta}}$ ), amb un valor de circulació imposat pel fet que les velocitats al caire de sortida són iguals a extradós i intradós –si el caire de sortida és afilat– o pel fet que hi ha un punt d'estancament al caire de sortida –si aquest és arrodonit (vegeu figura 4.35). Aquest valor de circulació  $\Gamma_{\text{Kutta}}$  és adoptat automàticament durant el desenvolupament de la sustentació.



L'evolució de la sustentació en variar l'angle d'atac és el següent: per petits angles d'atac apareix un gradient de pressions advers a la part posterior del perfil, però no és suficientment gran com perquè es desprengui la capa límit. La situació és la de la figura 4.34d, on la resistència és baixa i la sustentació excel·lent.

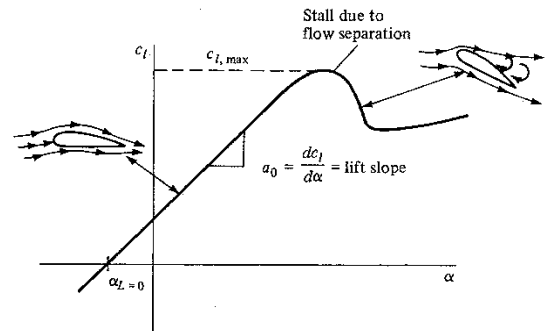


Figura 4.36: Gràfica de variació del coeficient de sustentació  $C_L$  en funció de l'angle d'atac [6]

Si es continua augmentant l'angle d'atac, el gradient de pressions a l'extradós esdevé més intens fins arribar a un angle  $\alpha$  de 15-20° on el corrent es desprèn de l'extradós i el perfil entra en pèrdua –mostrat a la figura 4.37–, fet que provoca la pèrdua de la sustentació i un augment elevat de la resistència, i perd així la seva funció.

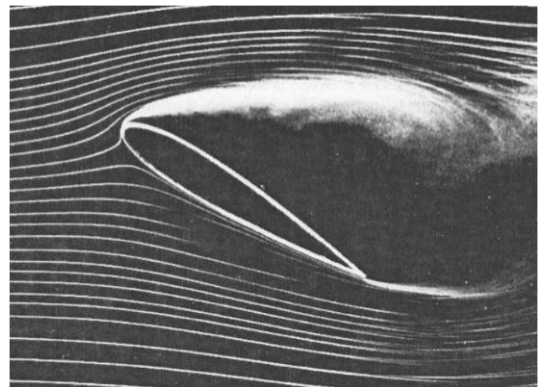


Figura 4.37: Separació de les línies de corrent a l'extradós resultant en l'entrada en pèrdua del perfil [6]

L'evolució de la sustentació en variar l'angle d'atac fins a l'entrada en pèrdua es pot observar a la figura 4.36.

D'altra banda, cal minimitzar la resistència a l'avanç. Per tal d'aconseguir poca resistència a elevats nombres de Reynolds, que en cossos plans és provocada principalment per fricció ( $D_f$ ), s'intenta mantenir una capa límit laminar al llarg del perfil fins on sigui possible ja que la resistència a l'avanç degut a la fricció és menor en flux laminar que en flux turbulent (figura 4.38) [6]. Implica que la superfície ha de ser llisa –o el menys rugosa possible– i que

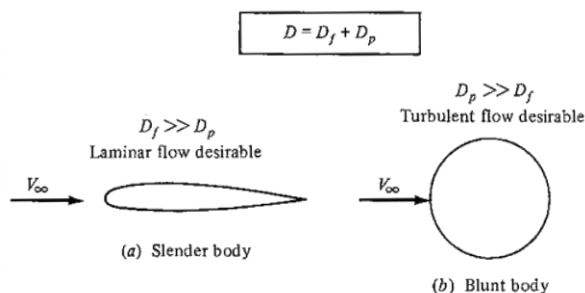


Figura 4.38: Resistència a l'avanç en cossos plans i rons [6]

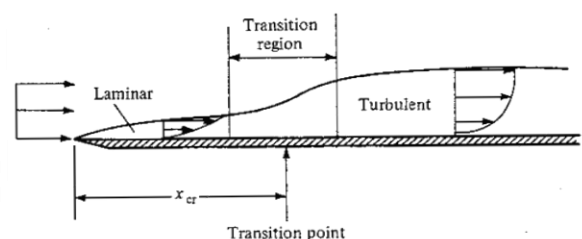


Figura 4.39: Transició de capa límit laminar a capa límit turbulenta [6]

la forma del perfil retardi el màxim possible la transició de capa límit laminar a turbulenta (figura 4.39).

A baixos nombres de Reynolds, les forces viscoses predominen per sobre de les d'inèrcia i, per tant, el comportament dels cossos és molt diferent. En canvi, augmentar el nombre de Reynolds es tradueix en un increment de la sustentació màxima i de l'angle d'entrada en pèrdua, així com també en una disminució del coeficient de resistència a l'avanç [9].

Un paràmetre important a tenir en compte és la relació d'aspecte AR de l'ala (*Aspect Ratio*),

$$AR = \frac{b^2}{A_p} = \frac{b}{c} \quad (\text{Equació 4.10})$$

ja que els resultats que s'obtenen en fer els càlculs de sustentació i resistència a l'avanç són per perfils d'envergadura infinita –consideren un flux bidimensional entorn unes ales sense extrems, considerant només la secció. Aquest paràmetre és la proporció entre l'envergadura i la corda, i influeix significativament en els coeficients  $C_L$  i  $C_D$ , tal i com es mostra a la figura 4.40.

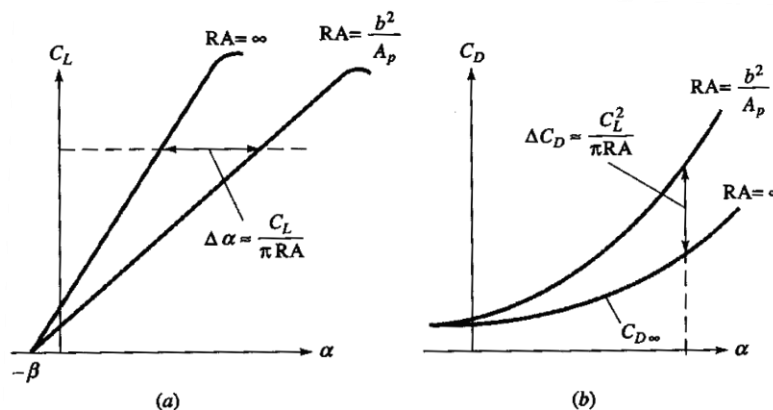


Figura 4.40: Efecte de l'allargament finit en la sustentació i resistència d'un perfil: (a) augmenta l'angle d'atac efectiu i (b) la resistència induïda [9]

La causa de l'empitjorament del rendiment del perfil és degut que totes les ales reals tenen extrems, on es generen remolins (figura 4.42) –remolins de punta d'ala– deguts a la diferència de pressions entre intradós i extradós, que fa que les línies de corrent de l'intradós tendeixin a dirigir-se cap a l'extradós (figura 4.41). Aquests remolins provoquen que l'ala “vegi” un angle d'atac més petit i es redueixi la sustentació, augmenti la resistència i el consum de l'energia del sistema de propulsió. Implica que per obtenir una sustentació

igual, s'ha d'augmentar l'angle d'atac. És per això que moltes vegades s'incorporen *winglets* a les puntes de les ales per reduir els efectes d'aquests vòrtexs.

Els coeficients de sustentació i resistència tenen una forta dependència amb la relació d'aspecte, més que amb l'àrea en planta  $A_p$  de l'ala.

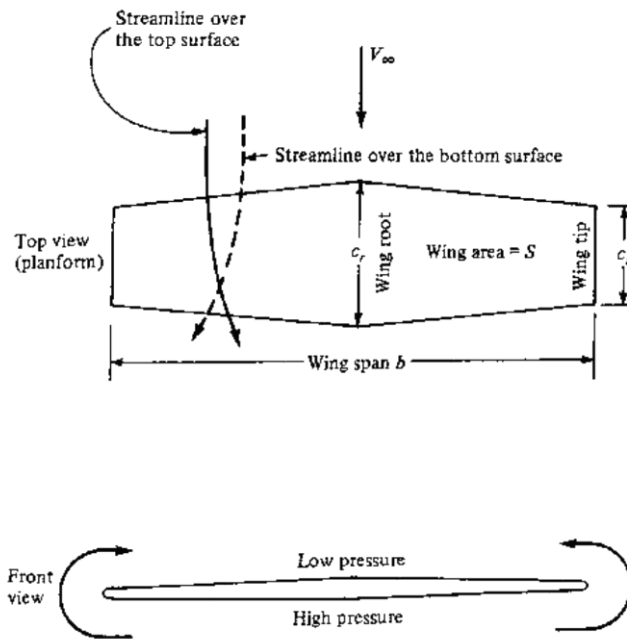


Figura 4.41: Ala finita amb la curvatura de les línies de corrent degut a la diferència de pressions entre intradós i extradós [6]

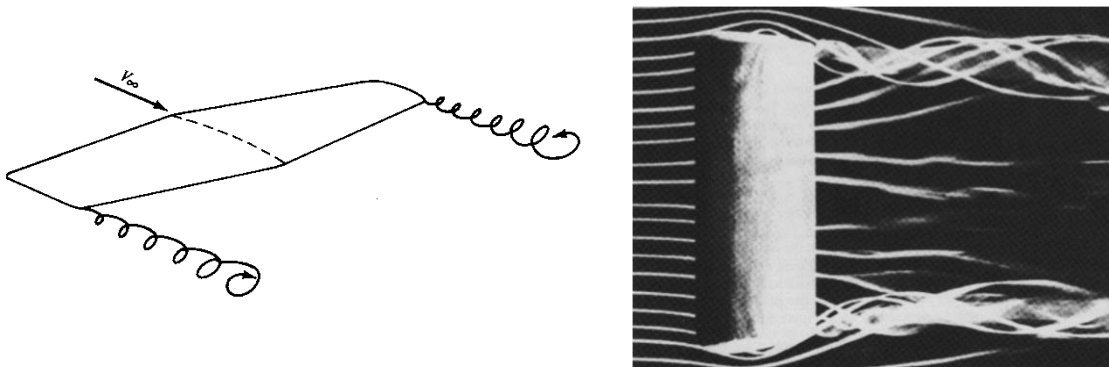


Figura 4.42: Vòrtexs o remolins de punta d'ala (*wing-tip vortices*) [6]

### 4.2.3 Altres fenòmens relacionats: la cavitació

Tot i que durant els estudis de Grau a l'assignatura Mecànica de Fluids no s'ha aprofundit en els coneixements sobre aquest fenomen, és important conèixer-lo amb més detall ja que és un factor a tenir en compte per dissenyar un *hydrofoil* en funció de la velocitat a la que treballem, o el perfil que s'està utilitzant.

Hi ha diverses causes que provoquen l'aparició de cavitació [10] però ens limitarem a la que ens ocupa: la cavitació als *hydrofoils* causada pel flux en moviment al seu voltant.

La cavitació és el procés de formació de la fase vapor d'un líquid quan se l'exposa a pressions reduïdes a una temperatura ambient constant. Tenint en compte l'equació de Bernoulli  $\frac{1}{2}\rho u^2 + \rho gh + p = \text{constant}$  (Equació 4.11), aquest fenomen es donarà quan la velocitat es vegi més incrementada –si el flux té la suficient velocitat i considerant que el procés es dona a temperatura constant (figura 4.43), ja que serà on ha disminuït més la pressió.

Aquest canvi de fase es manifestarà en forma de bombolles de vapor que creixen degut a una reducció de la pressió. Llavors, el flux bifàsic que se'n deriva, compost pel líquid i el seu vapor, s'anomena flux cavitacional.

La cavitació a l'*hydrofoil* sorgeix a l'extradós quan la pressió baixa fins a la pressió de saturació del vapor. Concretament aquest nucli de baixes pressions està situat a la zona de desprendiment de la capa límit laminar (figura 4.44a).

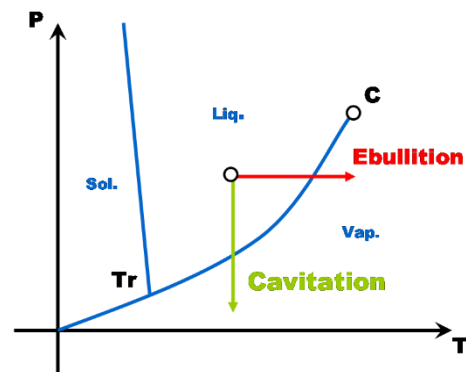


Figura 4.43: Diagrama P-T on es pot observar com, mantenint la temperatura constant, disminuint la pressió arriba un punt on es fa la transició a fase vapor, fet que origina el fenomen de cavitació

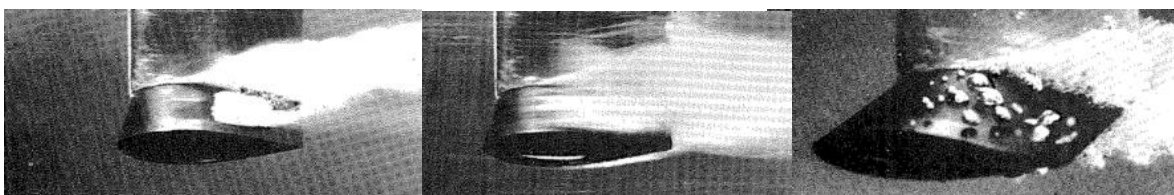


Figura 4.44: (a) Aparició del fenomen de cavitació, (b) transició a capa límit turbulenta i (c) bombolles que componen el flux cavitacional observat aplicant centellejos de llum [11]

Si s'augmenta la velocitat, i per tant el número de Reynolds, es produeix la transició de capa límit laminar a turbulenta i la cavitació comença prop de la línia de mínima pressió, a prop del caire d'atac (figura 4.44b).

Aplicant un centelleig de llum amb un estroboscopi a aquest últim flux, es pot apreciar que aquest flux cavitacional està format per bombolles independents (figura 4.44c).

Aquestes bombolles segueixen un procés que és el següent: creixen mentre es troben a la zona de baixa pressió (fase de creixement) i implosionen quan en seguir la seva trajectòria desemboquen a una regió d'altres pressions (fase de col·lapse). [11]

Per un perfil simètric, els factors que contribueixen a l'aparició de cavitació són: l'augment de l'angle d'atac, la disminució de la pressió de l'ambient o l'augment de la velocitat del fluid.

#### *Efectes de la cavitació i el flux cavitacional*

- Danys per cavitació, destrucció total o parcial del perfil: les pressions que es donen durant el col·lapse de les bombolles són suficientment elevades com per causar la fallida de metalls. A més, si la bombolla col·lapsa en un camp de pressions asimètric es produeix un *jet* o raig del fluid (figura 4.46) que va a una velocitat molt elevada (fins a 1000 m/s) i, si impacta contra una superfície, li causa uns esforços molt elevats que contribueixen a la pèrdua de material formant cavitats a la superfície. Les pressions poden arribar al valor de 1000 MPa (10000 bar).
- La sustentació disminueix i la resistència a l'avanç augmenta (figura 4.45).
- El flux esdevé inestable i es produeixen vibracions.
- Les bombolles en implosionar generen soroll.

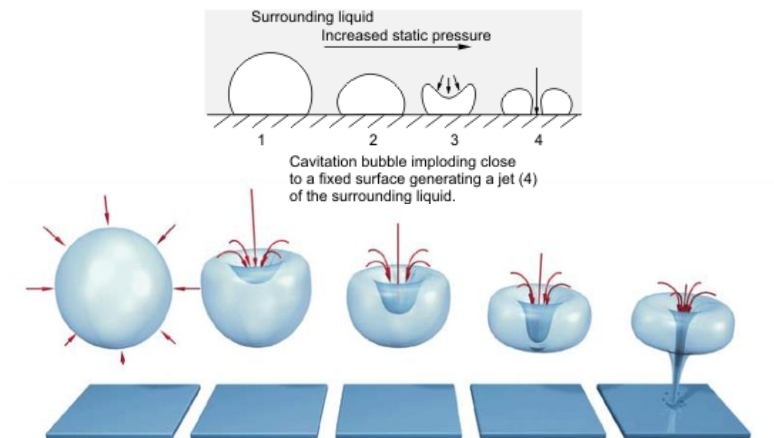


Figura 4.46: Implosió d'una bombolla, causa de la destrucció del material que es produeix degut a la formació de jets a altes velocitats [10]

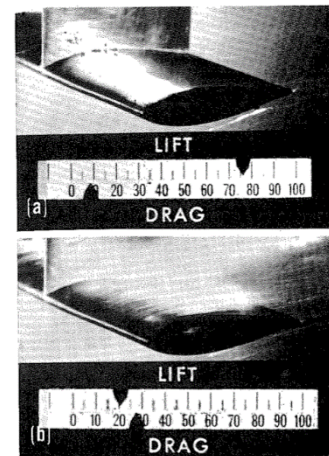


Figura 4.45: Efecte de la cavitació sobre la sustentació (*Lift*) i la resistència a l'avanç (*Drag*) [11]

La cavitació es pot intentar evitar augmentant la diferència entre la pressió estàtica del fluid i la seva pressió de vaporització a la temperatura actual. Això es pot aconseguir *reduint la temperatura del fluid* –ja que la pressió de vaporització disminuirà tal com es pot observar a la figura 4.43– o *augmentant la pressió del sistema*, allunyant-nos així de la línia de canvi de fase. Cal esmentar que aquests factors no sempre seran controlables per l'usuari i, per tant, s'haurà d'evitar la cavitació fent una elecció adequada del perfil utilitzat i el seu material [12].

Hi ha molts altres factors que afavoreixen l'aparició de cavitació en *hydrofoils* d'entre els quals hi ha el fet de tenir una viscositat del fluid elevada, la rugositat d'un perfil –que afavoreix la pèrdua de càrrega i el despreniment–, les vibracions –que afegeixen un component de velocitat–, la compressibilitat del fluid o la conductivitat tèrmica del perfil [10].

### Tipus de cavitació

- Segons el mecanisme generador
  - *Cavitació hidrodinàmica* (depressions locals degudes al camp de velocitats)
  - *Cavitació acústica* (depressions creades per ones de pressió)
- Segons el grau de desenvolupament
  - *Cavitació incipient*: primeres fases de la cavitació.
  - *Cavitació desenvolupada*: si continua disminuint la pressió.
  - *Supercavitació*: el col·lapse de les bombolles de la cavitació es desplaça més enllà de l'objecte submergit i el perfil queda envoltat per bombolles d'aire. L'inconvenient que té aquest tipus de cavitació és que es necessita treballar amb elevats angles d'atac per mantenir estable aquesta bombolla d'aire, fet que augmenta considerablement la resistència a l'avanç del perfil. La relació sustentació-resistència a l'avanç disminueix considerablement i per això no és utilitzat en hydrofoils.
- Segons la forma de les cavitats
  - *Cavitació de bombolles separades*: pot aparèixer, per exemple, a la cara de succió d'un àlep d'una bomba o turbina a la zona de mínima pressió (figura 4.47b).
  - *Cavitació de làmina enganxada*: es pot produir a l'entrada dels perfils quan la geometria no és correcta o es treballa fora del punt de disseny (per exemple, per angles d'incidència massa grans o per velocitats molt elevades) (figura 4.47b).
  - *Cavitació de vòrtex*: és un tipus de cavitació que es troba a la part posterior dels perfils, com es pot observar a les figures 4.48 i 4.49.



Figura 4.47: Diferents tipus de cavitació en hydrofoils: a la primera figura es pot observar cavitació parcial, al segon presenta cavitació de làmina enganxada al començament i de bombolles cap al final, i l'última figura presenta un tipus de cavitació que recorda un núvol. [20]



En un perfil aerodinàmic, la cavitació seguirà un cicle [10]:

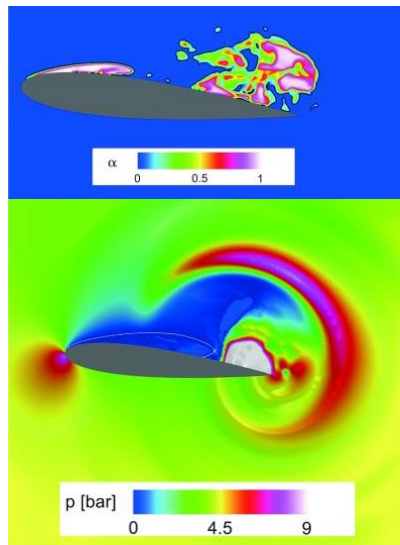


Figura 4.48: Percentatge en massa de vapor (títol) i pressions desenvolupades en el perfil

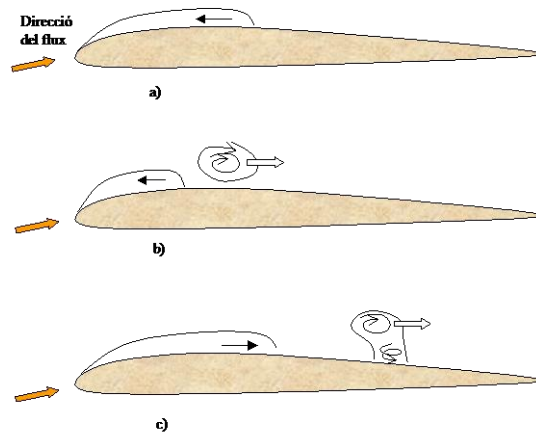


Figura 4.49: Cicle de cavitació en un perfil aerodinàmic [10]

Inicialment es mostra la cavitació de làmina enganxada (figura 4.49a) i hi ha representada la làmina que es redueix degut a una recirculació al voltant del perfil.

A continuació la làmina continua retrocedint i es forma una cavitat de vapor de tipus vòrtex que arrossegada pel flux es desprèn (figura 4.49b).

Finalment la làmina torna a créixer mentre que la cavitat despresa es transforma en un vòrtex de ferradura que impacta sobre l'àlep i genera vibracions i erosiona la superfície (figura 4.49c).

#### *Cavitació i semblança*

Tal com es va estudiar a Mecànica de Fluids, la semblança és útil per obtenir informació sobre com es comportarà un prototip mitjançant la realització d'experiments amb un model a escala d'aquest prototip.

El paràmetre que descriu les condicions de semblança en termes de cavitació és el coeficient de cavitació ( $C_a$ ).

$$C_a = \frac{p - p_v}{\rho \cdot u^2}$$

(Equació 4.12)



El coeficient de cavitació ( $C_a$ ) és un nombre adimensional que expressa la relació entre la diferència entre la pressió absoluta local i la pressió de vapor del fluid respecte l'energia cinètica per volum. S'utilitza per quantificar la possibilitat que es desenvolupi el fenomen de cavitació al flux.

El coeficient de cavitació pel qual comença a desenvolupar-se la cavitació s'anomena coeficient de cavitació crític. Per sobre d'aquest valor no es produirà cavitació. Per sota, sí que es produirà ja que implica una pressió absoluta inferior a la pressió crítica.

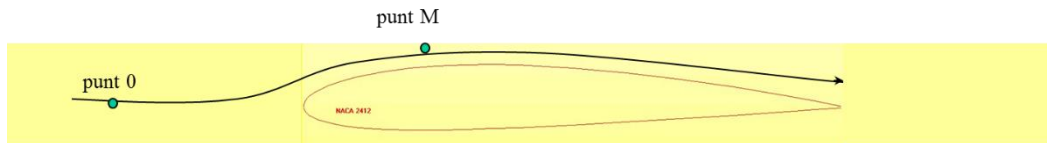


Figura 4.50: Balanç entre dos punts d'una mateixa línia de corrent [10]

Per tant, si realitzem un balanç mitjançant l'equació de Bernoulli entre els punts 0 i M (figura 4.50),  $\frac{1}{2}\rho u_0^2 + \rho g h_0 + p_0 = \frac{1}{2}\rho u_M^2 + \rho g h_M + p_M + \Delta p$  (Equació 4.13)

obtenim la següent condició per tal que no hi hagi cavitació al punt M del perfil:

$$C_a(M) = \frac{p_M - p_0}{\frac{1}{2}\rho u_0^2} > -\frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2}\rho u_0^2} \quad (\text{Equació 4.14})$$

Les dimensions del sistema físic no estan considerades al coeficient de cavitació, però sí que ho estan al nombre de Reynolds (equació 4.2), que relaciona les forces d'inèrcia amb les de viscositat.

Per tant, si es tenen en compte els efectes del nombre de Reynolds adequadament, la semblança en termes de cavitació tan sols requereix que el coeficient de semblança sigui el mateix per prototip i model [11].

#### 4.2.4 Criteris de selecció

Per tal de seleccionar un perfil es mira la seva geometria, la seva distribució de pressions, però també s'han de mirar les dades de funcionament del perfil, com són  $C_L$ ,  $C_D$  i  $C_M$ , per tal de satisfer les especificacions. Normalment es miraran els gràfics d'aquests coeficients adimensionals en funció de l'angle d'atac. Els més habituals són:

- *Variació de  $C_L$  en funció d' $\alpha$* : útil per a la determinació de l'angle d'entrada en pèrdua –relacionat directament amb la seguretat de funcionament– el qual interessa que sigui el més gran possible. Acostuma a ser d'uns 16-20°. A aquest angle normalment li correspon el  $C_{Lmax}$ , el qual indica la capacitat màxima de generar sustentació – també important per a la seguretat. És important també que després de l'entrada en pèrdua la caiguda de la sustentació no sigui gaire abrupta.
- *Variació de  $C_M$  al 25% de la corda en funció d' $\alpha$* : normalment aquest gràfic té pendent negatiu i està als valors de moment negatius que fan tendir el caire d'atac a anar cap avall, fet que provoca una autoestabilització de l'ala. Es busca minimitzar aquest moment de capcineig per aconseguir equilibri.
- *Variació de  $C_L/C_D$  en funció d' $\alpha$* : aquest gràfic acostuma a tenir un màxim. Interessa que la zona entorn el màxim sigui ampla per tal d'aconseguir una bona estabilitat enfront variacions en l'angle d'atac. És un gràfic interessant en el sentit que no només busca una gran sustentació sinó que també es té en compte la força de propulsió que necessita l'embarcació per avançar, la qual es vol minimitzar.
- *Variació de  $C_D$  en funció de  $C_L$* : important per veure el valor de  $C_{Dmin}$ , ja que està directament relacionat amb el cost de propulsió. Acostuma a ser un valor d'entre 0,003 i 0,006. Es desitja que  $C_{Dmin}$  no es limiti a un sol punt, sinó a tota una regió on es pugui variar la sustentació mantenint la resistència. D'aquest gràfic se'n pot obtenir el rati  $(C_L/C_D)_{max}$

En general, aquests són els principals criteris utilitzats per a la selecció de seccions per tal de complir unes certes especificacions:

- Secció amb el major coeficient  $C_{Lmax}$
- Secció amb el menor coeficient  $C_{Dmin}$
- Secció amb el major rati  $C_L/C_D$  (rendiment aerodinàmic)
- Secció amb el menor moment de capcineig  $C_{Mmin}$
- Secció amb una caiguda de sustentació suau en entrar en pèrdua
- Manufacturable: per exemple, la secció ha de ser prou gruixuda com perquè hi càpiguen reforços estructurals.
- Cost acceptable

#### 4.2.5 Procés a seguir per al disseny dels perfils d'una embarcació

El procés de disseny dels perfils d'una embarcació comença amb una variable coneguda ( $A_P$ ) i, considerant totes les especificacions de disseny, s'obtenen la resta de paràmetres. Aquestes especificacions –rendiment, estabilitat, control i seguretat, entre d'altres– s'han de complir per totes i cada una de les operacions de l'embarcació.

Una de les eines necessàries durant el procés de disseny d'hidroales és una tècnica per tal de calcular la sustentació, la resistència a l'avanç i el moment de capcineig de la hidroala. Amb el progrés de l'aerodinàmica i la hidrodinàmica hi ha diverses eines i tècniques per a realitzar aquests càlculs mitjançant un computador. S'anomena CFD (*Computational Fluid Dynamics*) o mecànica de fluids per computador, on mitjançant els mètodes numèrics i diversos algoritmes de càlcul –equacions de Navier-Stokes i teoria de perfils prims entre d'altres– s'obtenen els paràmetres desitjats. Des de fa uns anys, aquesta eina ha anat millorant i ara ja incorpora la teoria de flux potencial juntament amb la teoria de capa límit, fet que provoca una millora en precisió i resultats. Com a conseqüència, es redueixen considerablement els costos de disseny per ús de túnels de vent ja que no són tan necessaris.

Cal fer especial èmfasi al fet que el disseny d'hidroales és un procés iteratiu fins arribar a uns paràmetres en què les especificacions es compleixen. Es parteix del paràmetre  $S$  i acaba amb l'optimització del perfil. A partir d'unes especificacions de disseny es determinen el nombre d'ales, la seva posició, la secció de l'ala, l'AR i d'altres paràmetres. Posteriorment es calculen la sustentació, la resistència a l'avanç i el moment de capcineig, i es comprova

que es compleixin les especificacions de disseny. En cas que no es compleixin, el procés es torna a repetir.

Els paràmetres significatius a determinar durant el disseny de perfils sustentadors són els següents:

- Superfície en planta ( $A_p$ ): en funció de la sustentació necessària.
- Nombre d'hidroales: s'ha d'escollir el nombre d'hidroales a l'embarcació. Una manera de reduir l'envergadura de les hidroales és augmentant-ne el nombre.
- Configuració de les hidroales a l'embarcació (4.1.2 Tipus d'*hydrofoil*)
- Secció o perfil: és el segon paràmetre més important després de la superfície en planta. És el responsable de la generació de la distribució òptima de pressions a les superfícies superior i inferior de l'ala per tal de crear la sustentació necessària al mínim cost aerodinàmic (resistència i moment de capcineig).
- Relació d'aspecte o *Aspect Ratio* (AR): com s'ha vist a la figura 4.40, com més alt és l'AR, més es redueix la influència dels remolins en punta d'ala ja que es tendeix a les característiques aerodinàmiques d'una secció 2D. Tot i que es milloren les prestacions aerodinàmiques, hi ha la limitació estructural de l'ala. Arribats a una certa proporció elevada, l'estructura necessària per sostenir l'ala serà massa pesada, cara, difícil de manufacturar, poc rígida, menys maniobrable i esdevé inviable.
- Envergadura (b)
- Corda (c)
- Altres paràmetres que queden fora de l'abast d'aquest treball: corda a la punta d'ala, corda a l'arrel de l'ala, proporció entre els dos paràmetres anteriors, angles de disposició de l'ala en planta i frontalment, i dispositiu d'elevada sustentació com els *flaps*.

## 5 PART EXPERIMENTAL

### 5.1 OBJECTIUS I METODOLOGIA

Després de conèixer els fenòmens relacionats amb els *hydrofoils*, es planteja la selecció d'un perfil d'entre vuit possibilitats diferents i el posterior disseny de les corresponents hidroales per a una embarcació en concret, optimitzant els paràmetres desitjats.

Els perfils seleccionats (vegeu 5.2) han estat simulats mitjançant el programari específic de simulació de perfils VisualFoil 4.1, mitjançant el qual s'han obtingut diversos gràfics, com el  $C_L/C_D - \alpha$ ,  $C_L - \alpha$ ,  $C_M - \alpha$ , i valors d'aquests coeficients per a diferents angles d'atac (vegeu annex B.2 Dades dels perfils). D'entre les tres opcions de models aerodinàmics diferents que disposa VisualFoil 4.1 per a realitzar les simulacions, s'ha escollit el model que té en compte la capa límit ja que, com s'ha vist, té un paper important tant en la resistència a l'avanç com en el desenvolupament de la sustentació (vegeu annex B.1 Configuració de les simulacions).

El model d'embarcació escollit per a la implementació d'hidroales ha estat l'AC72, el catamarà dissenyat per a competir a l'*America's Cup 2013* i la *Copa Louis Vuitton 2013*, que pot assolir unes grans velocitats gràcies a la incorporació d'hidroales. La velocitat objectiu projectada va ser de 74,08 km/h (20,58 m/s). Per tant, es pren aquest valor de velocitat relativa entre el fluid i l'*hydrofoil*.

Tot i saber que les hidroales que incorpora tenen uns 2 m d'envergadura i 0,7 m de corda (1,4 m<sup>2</sup> de superfície cada una) [13], s'ha pres un valor de corda de la hidroala de la simulació de 0,5 m, per tal d'augmentar el valor de la relació d'aspecte (AR=4), tal com recomana la bibliografia [8], per disminuir els efectes dels remolins en punta d'ala que es formen. Amb aquestes dimensions queda una  $A_p = 1 \text{ m}^2/\text{hidroala}$ .

Aquesta embarcació navega per aigua salada. Aquesta aigua es troba aproximadament a uns 20°C de temperatura i té una viscositat cinemàtica  $\nu$  en aquestes condicions de  $1,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [14].

De les dades anteriors en surt un nombre de Reynolds d'aproximadament  $Re = 1 \cdot 10^7$ . Aquest valor ha estat l'utilitzat per a la realització de les simulacions dels perfils amb el VisualFoil 4.1 (vegeu annex B.1 Configuració de les simulacions).

Amb la informació de les simulacions ja obtingudes, s'analitzen tots els perfils individualment i es fa una comparativa entre ells per tal de decidir quin és el perfil òptim per a l'embarcació escollida.

D'entre els diversos criteris de selecció proposats en la bibliografia, s'opta per la maximització del rendiment aerodinàmic del perfil.

Aquest gràfic acostuma a tenir un màxim. Interessa que la zona entorn el màxim sigui ampla per tal d'aconseguir una bona estabilitat enfront variacions en l'angle d'atac. És un gràfic interessant en el sentit que no només busca una gran sustentació sinó que també es té en compte la força de propulsió que necessita l'embarcació per avançar, la qual es vol minimitzar.

D'altra banda, les hidroales amb el perfil seleccionat treballant en els angles d'atac escollits hauria de ser capaç de generar, com a mínim, la sustentació necessària per igualar el pes de l'embarcació. D'aquest raonament n'obtenim el valor de  $C_L$  mínim que ha de proporcionar el perfil.

L'àrea utilitzada segons la teoria de perfils prims en el càlcul de  $C_L$  correspon a l'àrea en planta amb un factor correctiu:

$$A_L = A_D = A_P \sin \alpha = b \cdot c \cdot \sin \alpha = 2 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} \cdot \sin \alpha = \sin \alpha \frac{m^2}{\text{hidroala}}$$

(Equació 5.1)

Encara que l'embarcació AC72 disposa de quatre *hydrofoils* –dos a les quilles i dos més als timons dels dos cascos– en el càlcul de la sustentació d'aquestes hidroales es considera que tota la sustentació és generada per les dues hidroales de les quilles. Per tant, utilitzant l'equació 4.8 i sabent que es disposa de dues hidroales entre les que es reparteix el pes de l'embarcació, es pot calcular el coeficient de sustentació mínim necessari per tal de compensar totalment ( $p = 1$ ) o parcialment ( $0 < p < 1$ ) el pes de l'embarcació:

$$C_{L_{\min}} = \frac{p \cdot mg}{\frac{1}{2} \rho u^2 A_L} = \frac{p \cdot 5900 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{1}{2} \cdot 1028,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(20,58 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 2 \text{ hidroales} \cdot A_p \sin \alpha \frac{\text{m}^2}{\text{hidroala}}} = \frac{p \cdot 0,13286}{A_p \sin \alpha}$$

(Equació 5.2)

En tot perfil s'ha de treballar en les condicions òptimes. Aquest fet implica que primer s'analitzaran els perfils i els seus punts òptims de treball i, posteriorment, es comprovarà si aquestes condicions de treball òptimes del perfil s'adeqüen a les necessitats de l'embarcació.

## 5.2 PERFILS SELECCIONATS

D'entre els centenars de perfils ja catalogats que existeixen s'han escollit les quatre famílies de seccions d'ala més conegudes i destacades: els perfils Eppler, els Wortmann FX, els Gottingen i els perfils NACA. De cada una d'elles s'han escollit els dos perfils que, mitjançant recerca d'informació, s'ha considerat que s'utilitzen més habitualment, o que tenen un tret característic en la geometria.

Cal esmentar que, en general, no són perfils especialment dissenyats per a l'ús com a *hydrofoil*, és a dir, utilitzats en medi aquàtic; són perfils aerodinàmics dissenyats principalment per ser utilitzats com a *airfoils* (per aire), però degut que el principi físic de funcionament és el mateix, aquests perfils seran igualment adequats per a l'aplicació en embarcacions.

A continuació es mostren les seccions dels perfils d'ala escollits per a l'estudi (figures 5.1 a 5.8) [15]:

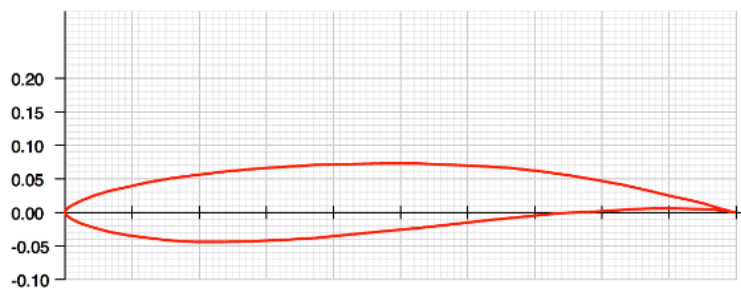


Figura 5.1: Perfil EPPLER 817 HYDROFOIL AIRFOIL

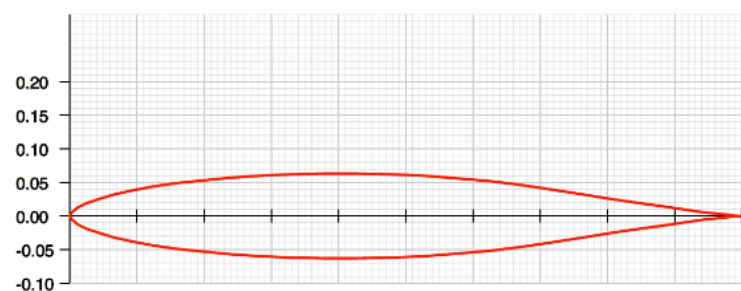


Figura 5.2: Perfil EPPLER E836 HYDROFOIL AIRFOIL

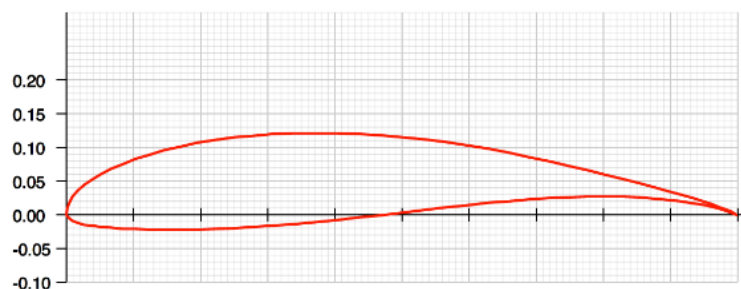
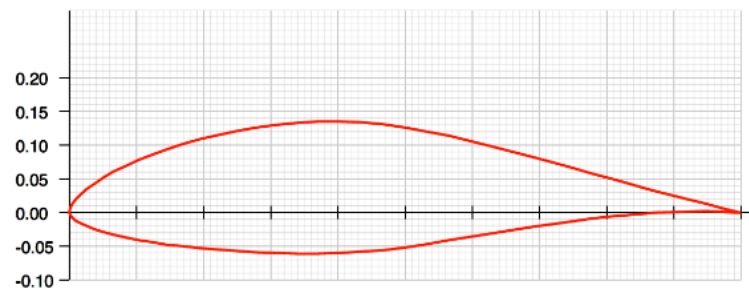
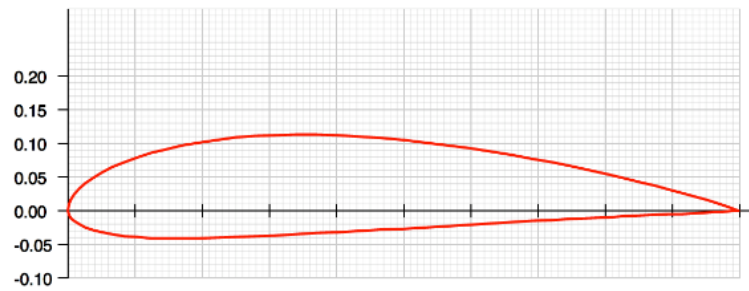
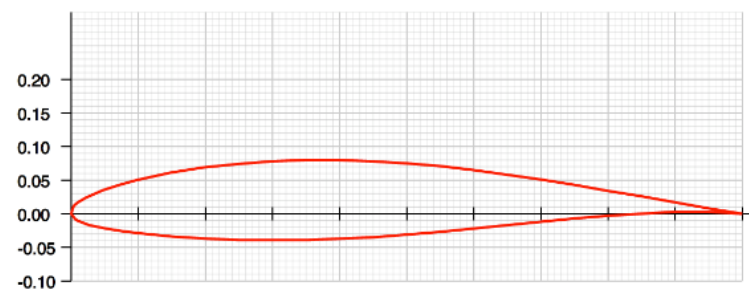
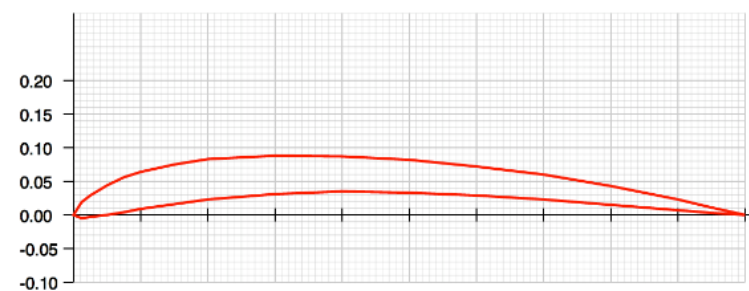
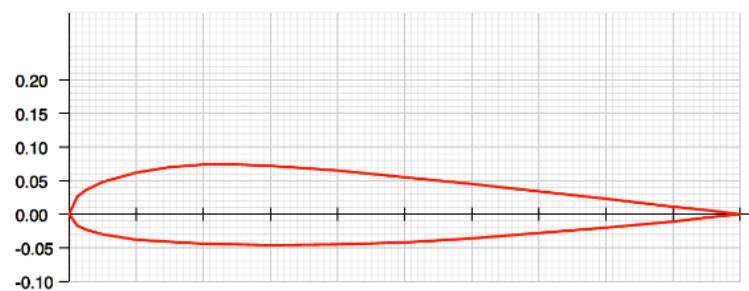


Figura 5.3: Perfil WORTMANN FX 63-137 AIRFOIL



*Figura 5.4: Perfil FX 66-S-196 AIRFOIL**Figura 5.5: Perfil NACA 4415**Figura 5.6: Perfil NACA 63-412**Figura 5.7: Perfil GOE 417 AIRFOIL**Figura 5.8: Perfil GOE 766 AIRFOIL*

## 5.3 ANÀLISI DE LES SIMULACIONS

### 5.3.1 Primera anàlisi

A partir de les dades obtingudes de les simulacions s'analitzen els coeficients de sustentació, resistència a l'avanç i rendiment aerodinàmic.

En el cas del rendiment aerodinàmic es busca una zona estable entorn el punt òptim, el més plana possible a la gràfica, perquè influeix directament en l'estabilitat de l'embarcació i en la sensació de seguretat que pugui transmetre. Per tal de tractar els diferents perfils amb igualtat, considerarem acceptable un interval d'angles d'atac que compregui el valor més elevat de rendiment aerodinàmic i l'interval d'angles d'atac que tenen un rendiment fins a quinze punts inferior al màxim aproximadament.

Totes les dades comentades en aquest apartat corresponen als resultats obtinguts per simulació. Per cada perfil es disposa de dades numèriques, gràfiques i figures de la capa límit, dels punts d'estancament, de transició i de separació, de les línies de corrent i de les distribucions de velocitat i pressió entorn el perfil (es pot trobar la informació de cada perfil al seu corresponent apartat de l'annex B.2 Dades dels Perfils).

A les taules de dades numèriques es troba ressaltat en negreta el rang de valors d'angles d'atac considerat segons el criteri explicat anteriorment. Ressaltat en color verd es troba el valor de màxim rendiment del perfil; en blau, el valor de màxim coeficient de sustentació; i en taronja, el valor de mínim coeficient de resistència a l'avanç.

De cada angle d'atac de l'interval que es considerarà, se'n coneix el coeficient de sustentació  $C_L$ . Mitjançant l'equació 5.2 considerant que es vol elevar la totalitat del pes de l'embarcació ( $p = 1$ ) es pot trobar el valor  $C_{Lmin}$  necessari. Comparant els dos valors anteriors es pot trobar el valor  $p$ , proporció en tant per u del pes de l'embarcació que els perfils seran capaços de sustentar per aquell angle d'atac.

A continuació, s'analitzen els perfils.

### 5.3.1.1 Perfil EPPLER 817 HYDROFOIL AIRFOIL

El diagrama del rendiment aerodinàmic  $\beta = C_L/C_D$  presenta un màxim en forma de pic als  $0^\circ$  però en ser una zona poc estable interessa més la zona de valors més baixos, amb l'avantatge que és més robusta per canvis en l'angle d'atac. Aquesta zona, segons el criteri comentat, comprèn els angles d'atac entre els  $3^\circ$  i els  $8^\circ$  aproximadament. El valor màxim de rendiment aerodinàmic es troba als  $7^\circ$  i és  $\beta_{\max}=126,13$ .

$\alpha$	$C_L$	$C_{Lmin}$	$p$
$3^\circ$	0,8389	2,5385	0,3305
$4^\circ$	0,9420	1,9046	0,4946
$5^\circ$	1,0530	1,5244	0,6908
$6^\circ$	1,1628	1,2710	0,9149
$7^\circ$	1,2585	1,0902	1,1544
$8^\circ$	1,3658	0,9546	1,4307

Taula 5.1

Es pot observar a la taula 5.1 que de tots els angles d'atac considerats dins del rendiment aerodinàmic òptim tan sols n'hi ha dos que permeten fer "volar" l'embarcació ( $p \geq 1$ ).

Per haver estat el primer perfil en ser analitzat, s'ha simulat aquest perfil pels angles d'atac de  $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7^\circ$  i  $9^\circ$ , per veure l'evolució que presenta. Es pot observar com la sustentació va augmentant i el punt d'aplicació es va desplaçant cap al caire d'atac, com el punt de transició de capa límit laminar a turbulenta a l'extradós s'avança cap al caire d'atac i el de l'intradós cap al caire de sortida o com la separació del flux per baixos angles d'atac es dona just al caire de sortida, però a mesura que anem augmentant l'angle, la separació es dona lleugerament abans d'abandonar el caire de sortida.

Pel que fa a les línies de corrent, es pot observar com les línies per sobre el perfil s'ajunten perquè van a més velocitat i les de sota el perfil queden més separades. També és interessant veure com evoluciona la distribució de pressions entorn el perfil: a mesura que s'augmenta l'angle d'atac, la depressió per sobre el perfil va augmentant, així com també la pressió per la part inferior que dona com a resultat una major sustentació.

### 5.3.1.2 Perfil EPPLER E836 HYDROFOIL AIRFOIL

La gràfica del rendiment aerodinàmic d'aquest perfil presenta un màxim als  $9,1^\circ$  ( $\beta_{\max}=103,656$ ) amb una zona amb bona continuïtat relativament plana que permet tenir un bon interval de valors d'angle d'atac, comprès entre els  $6^\circ$  i els  $13^\circ$ .

$\alpha$	$C_L$	$C_{Lmin}$	$p$
$6^\circ$	0,6824	1,2710	0,5369
$7^\circ$	0,7907	1,0902	0,7253
$8^\circ$	0,8962	0,9546	0,9388
$9^\circ$	0,9984	0,8493	1,1756
$9,1^\circ$	0,9980	0,8400	1,1881
$10^\circ$	1,0973	0,7651	1,4342
$11^\circ$	1,1918	0,6963	1,7116
$12^\circ$	1,2400	0,6390	1,9405
$13^\circ$	1,3240	0,5906	2,2417

Taula 5.2

A la taula 5.2 es pot observar que d'entre tots els angles d'atac considerats, bona part permetran que el perfil generi la sustentació suficient per elevar els cascos de l'aigua. Les hidroales generaran exactament la sustentació necessària per igualar el pes quan l'angle d'atac estigui entre  $8^\circ$  i  $9^\circ$  ( $p = 1$ ).

### 5.3.1.3 Perfil WORTMANN FX 63-137 AIRFOIL

El gràfic del rendiment d'aquest perfil, per limitacions del programari VisualFoil 4.1 no s'ha pogut visualitzar en la seva totalitat. D'altra banda sí que se'n coneixen les dades numèriques i també se sap que el gràfic del rendiment aerodinàmic acostuma a comportar-se d'una forma similar per angles d'atac positius com per negatius. Per tant, s'intueix que a la zona del màxim de la gràfica hi haurà un pic pronunciat tal com es pot observar per angles d'atac negatius.

Segons les dades obtingudes del programari, el màxim és de  $\beta_{\max}=197,40$  per un angle d'atac de  $2^\circ$  i seguint el criteri inicial, l'interval d'angles d'atac considerat comprèn valors entre els  $0^\circ$  i els  $4^\circ$ .

$\alpha$	$C_L$	$C_{Lmin}$	$p$
0,01°	1,0616	761,2133	0,0014
1°	1,1748	7,6125	0,1543
2°	1,2880	3,8068	0,3383
3°	1,4011	2,5385	0,5519
4°	1,5144	1,9046	0,7951

Taula 5.3

Es pot observar a la taula 5.3 que per cap dels angles d'atac considerats es genera la sustentació necessària per elevar la totalitat de l'embarcació de l'aigua ( $p \leq 1$ ). Com a màxim s'aconseguiria reduir un 79,5% el volum de l'embarcació que es troba per sota el nivell del mar i així es reduiria la superfície de fregament del casc amb l'aigua, fet que permetria augmentar la velocitat de l'embarcació però no assolir l'objectiu d'eleva el casc per sobre el nivell del mar.

Per intentar que aquest perfil pugui ser adequat a l'aplicació que se li vol donar i així pugui treballar a la zona de rendiment òptim, es podria intentar augmentar l'àrea en planta dels *hydrofoils*, per tal de generar més sustentació. Aquesta opció es valorarà després d'analitzar la resta de perfils.

#### 5.3.1.4 Perfil FX 66-S-196 AIRFOIL

Igual que en el cas anterior, visualment al gràfic no es pot veure el màxim però en coneixem les dades i sabem que es comportarà d'una manera similar que pels nombres negatius. El màxim del rendiment aerodinàmic es dona per un angle de 6° aproximadament amb  $\beta_{max}=201,2$ .

El pic és tan pronunciat que no presenta cap altre valor d'angle d'atac proper que tingui un rendiment de com a màxim quinze punts inferior. Aquest únic valor tampoc no és capaç d'equilibrar la totalitat del pes de l'embarcació. N'arriba a compensar el 92,55% com es pot observar a la taula 5.4, fet que farà que el casc estigui pràcticament fora de l'aigua, però no completament.

$\alpha$	$C_L$	$C_{Lmin}$	$p$
6°	1,1764	1,2710	0,9255

Taula 5.4

Pel fet que el rang d'angles d'atac que optimitzen el rendiment és nul, abans de la comparativa ja es pot concloure que aquest perfil no serà bo per l'aplicació que es vol donar a la hidroala, per falta d'estabilitat en el funcionament.

#### 5.3.1.5 Perfil NACA 4415

Analitzant la gràfica del rendiment d'aquest perfil podem observar que presenta una bona continuïtat i que el màxim es troba aproximadament als  $5,7^\circ$  amb un valor de  $\beta_{\max}=157,9$ . Segons el criteri seleccionat, el rang d'angles d'atac seleccionat va dels  $4^\circ$  als  $7^\circ$ .

$\alpha$	$C_L$	$C_{Lmin}$	$p$
$4^\circ$	0,9340	1,9046	0,4904
$5^\circ$	1,0341	1,5244	0,6784
$5,7^\circ$	1,0340	1,3377	0,7730
$6^\circ$	1,1445	1,2710	0,9005
$7^\circ$	1,2433	1,0902	1,1405

Taula 5.5

Tal com es pot observar a la taula 5.5 de tots els valors d'angle d'atac només n'hi ha un que proporciona la sustentació mínima per elevar tota l'embarcació. En el cas d'aquest perfil també es podria plantejar l'opció d'augmentar l'àrea en planta de les hidroales per aconseguir un valor de  $p \geq 1$  per l'angle d'atac  $\alpha=5,7^\circ$ , quan s'obté un rendiment òptim.

#### 5.3.1.6 Perfil NACA 63-412

Aquest perfil presenta una zona on el rendiment aerodinàmic té mínims i màxims locals entre els  $2^\circ$  i els  $10^\circ$  però aquests valors de rendiment es mantenen dins dels límits establerts pel criteri escollit. El màxim es troba als  $6^\circ$  i el seu valor és de  $\beta_{\max}=135,89$ .

$\alpha$	$C_L$	$C_{Lmin}$	$p$
2°	0,6207	3,8068	0,1630
3°	0,7337	2,5385	0,2890
4°	0,8479	1,9046	0,4452
5°	0,9602	1,5244	0,6299
6°	1,0716	1,2710	0,8431
7°	1,1463	1,0902	1,0515
8°	1,2302	0,9546	1,2886
9°	1,3234	0,8493	1,5582
10°	1,4118	0,7651	1,8453

Taula 5.6

Es pot observar a la taula 5.6 que aquest perfil és el que presenta, fins ara, el rang més elevat d'angles d'atac. A més, per gairebé la meitat dels valors d'angle d'atac l'embarcació rebrà la sustentació necessària per equilibrar el seu pes. No passarà per l'angle d'atac que correspon al màxim de rendiment aerodinàmic, que és capaç de compensar el 84,3% del pes de l'embarcació. Per aquest motiu també es podria plantejar augmentar lleugerament l'àrea en planta de les hidroales.

#### 5.3.1.7 Perfil GOE 417 AIRFOIL

Aquesta gràfica també ha quedat tallada per limitacions del programari, però mitjançant els valors numèrics es pot arribar a la conclusió que la gràfica presenta uns valors de rendiment dins el rang establert per uns angles d'entre 4° i 7°. El màxim del rendiment és de  $\beta_{\max}=181,83$  i es troba pel valor d'angle d'atac de 4°.

$\alpha$	$C_L$	$C_{Lmin}$	$p$
4°	1,0572	1,9046	0,5551
5°	1,1673	1,5244	0,7658
6°	1,2785	1,2710	1,0059
7°	1,3834	1,0902	1,2690

Taula 5.7

A la taula 5.7 es pot observar que per dos dels quatre valors la sustentació generada serà suficient per compensar el pes de tota l'embarcació però no pel cas de l'angle d'atac de 4°, que correspon al màxim de rendiment aerodinàmic.



### 5.3.1.8 Perfil GOE 766 AIRFOIL

Aquest últim perfil presenta una gràfica de rendiment amb bona continuïtat i amb un màxim amb una zona relativament plana. Per això se'n deriva un bon rang d'angles d'atac compresos entre 6° i 11°. El rendiment màxim és de  $\beta_{\max}=133,52$  per un angle d'atac de 8°.

$\alpha$	$C_L$	$C_{Lmin}$	$p$
6°	0,7406	1,2710	0,5827
7°	0,8532	1,0902	0,7827
8°	0,9634	0,9546	1,0092
9°	1,0763	0,8493	1,2673
10°	1,1831	0,7651	1,5464
11°	1,2862	0,6963	1,8472

Taula 5.8

Aquest perfil presenta una bona sustentació per la majoria de valors de l'interval d'angles d'atac considerat tal com es mostra a la taula 5.8 compensant el pes de l'embarcació – incloent l'angle d'atac pel que el rendiment aerodinàmic és màxim.

### 5.3.2 Primera comparativa de perfils

Tal com s'ha comentat a l'inici, mitjançant les simulacions s'ha obtingut un interval d'angles d'atac on es pot considerar que el rendiment aerodinàmic del perfil es troba a la zona òptima i amb una diferència màxima de 15 punts respecte al valor màxim de rendiment, és a dir, que no pateix una gran variació.

A partir de les dades obtingudes de les dades numèriques i de les gràfiques, se'n fa una comparativa per tal de facilitar la selecció del perfil òptim. Les dades es troben a continuació a la taula 5.9 on s'indica si la gràfica del rendiment aerodinàmic presenta una zona estable o no, l'interval d'angles d'atac corresponents a la zona de rendiment òptim del perfil  $[\alpha_1, \alpha_2]$ , el rang d'aquests angles d'atac  $\Delta\alpha$ , el rendiment màxim del perfil  $\beta_{max}$ , l'angle d'atac pel qual es té aquest rendiment màxim  $\alpha(\beta_{max})$  i el subinterval d'angles d'atac anterior que compleix també que les hidroales seran capaces d'enlairar completament l'embarcació respecte el nivell de l'aigua –d'aquesta manera es pot comprovar si l'angle òptim  $\alpha(\beta_{max})$  es troba o no dins l'interval d'angles que enlairaran l'embarcació. També s'hi incorpora el rang de valors de l'interval d'angles que enlairen l'embarcació.

Perfil	Zona estable	$[\alpha_1, \alpha_2]$	$\alpha_2 - \alpha_1 (\Delta\alpha)$	$\beta_{max}$	$\alpha(\beta_{max})$	Interval d' $\alpha / p \geq 1$	$\Delta\alpha / p \geq 1$
E817	Sí	$[3^\circ, 8^\circ]$	$5^\circ$	126,126	$7^\circ$	$[7^\circ, 8^\circ]$	$1^\circ$
E836	Sí	$[6^\circ, 13^\circ]$	$7^\circ$	103,656	$9,1^\circ$	$[9^\circ, 13^\circ]$	$4^\circ$
FX 63-137	Pic mitjà	$[0^\circ, 4^\circ]$	$4^\circ$	197,398	$2^\circ$	$\emptyset$	$\emptyset$
FX 66-S-196	Pic elevat	$[6^\circ]$	$0^\circ$	201,194	$6^\circ$	$\emptyset$	$\emptyset$
NACA 4415	Pic mitjà	$[4^\circ, 7^\circ]$	$3^\circ$	157,904	$5,7^\circ$	$[7^\circ]$	$0^\circ$
NACA 63-412	Sí	$[2^\circ, 10^\circ]$	$8^\circ$	135,888	$6^\circ$	$[7^\circ, 10^\circ]$	$3^\circ$
GOE 417	Pic mitjà	$[4^\circ, 7^\circ]$	$3^\circ$	181,834	$4^\circ$	$[6^\circ, 7^\circ]$	$1^\circ$
GOE 766	Sí	$[6^\circ, 11^\circ]$	$5^\circ$	133,522	$8^\circ$	$[8^\circ, 11^\circ]$	$3^\circ$

Taula 5.9

Es pot observar que hi ha varietat en els rangs de valors d' $\alpha$  en funció del perfil simulat. Tal com s'ha comentat, interessa un rang elevat, ja que l'embarcació pot patir canvis en l'angle d'atac de les hidroales per efectes de l'onatge o per ràfegues de vent, fet que no ha de comprometre l'estabilitat i la sensació de seguretat de l'embarcació.

Amb les dades anteriors es pot començar a deliberar sobre l'adequació o no dels diversos perfils per a l'aplicació d'hidroales a l'embarcació proposada.

Com que els perfils FX 63-137, FX 66-S-196, NACA 4415 i GOE 417 presenten un pic mitjà o pronunciat a la gràfica de rendiment aerodinàmic se'n deriva un rang de valors d'angle d'atac reduït.

- El perfil FX 63-137 no presenta cap valor d'angle d'atac pertanyent a l'interval òptim mitjançant el qual es pugui enlairar l'embarcació (taules 5.3 i 5.9).
- El perfil FX 66-S-196 presenta un únic valor dins els angles d'atac òptims, amb el que la hidroala no és capaç de compensar el pes total de l'embarcació (taules 5.4 i 5.9).
- El perfil NACA 4415, a més de tenir un rang reduït de  $3^\circ$ , només per un angle d'atac es pot arribar a elevar de l'aigua els cascos de l'embarcació (taules 5.5 i 5.9).
- GOE 417, a més de tenir un rang reduït de  $3^\circ$ , els dos angles d'atac pels que es podria compensar el pes de l'embarcació són els més allunyats del valor d'angle d'atac amb rendiment òptim (taules 5.7 i 5.9).

Amb aquests criteris, els quatre perfils anteriors queden descartats i continuen en el procés de selecció quatre perfils: E817, E836, NACA 63-412 i GOE 766.

- El perfil E817 presenta un rang d'angles d'atac de  $5^\circ$  i, dins d'aquest rang, pel valor òptim de rendiment del perfil, es genera la sustentació necessària per elevar el casc de l'aigua juntament amb un altre angle d'atac (taules 5.1 i 5.9). Es podria valorar l'opció d'augmentar l'àrea en planta de les hidroales per aconseguir elevar el casc per més valors d'angle d'atac dins el rang òptim.
- El perfil E836 té el segon interval d'angles d'atac més ample, és de  $7^\circ$ . A més, la majoria de valors d'aquest interval permeten l'enlairament de l'embarcació amb un valor de  $p \geq 1$  (taules 5.2 i 5.9). Per aquest perfil probablement no sigui necessari l'augment de l'àrea en planta perquè ja presenta un bon rang de valors amb una força resultant positiva.

- El perfil NACA 63-412 té el rang de valors d'angle d'atac més elevat de tots els perfils, amb gairebé la meitat que poden proporcionar la sustentació necessària per elevar el casc de l'aigua (taules 5.6 i 5.9). Tot i així, amb la hidroala configurada amb el valor d'angle d'atac pel que es té un rendiment òptim, seria capaç de compensar el 84,3% del pes de l'embarcació. Per aquest motiu, també es proposa augmentar lleugerament l'àrea en planta de les hidroales, per aconseguir compensar el pes total de l'embarcació per l'angle amb rendiment òptim.
- El perfil GOE 766 presenta un rang d'angles d'atac de 5° i les seves dues terceres parts –inclòs l'angle d'atac amb rendiment òptim– poden compensar el pes de l'embarcació (taules 5.8 i 5.9).

Valorant la primera anàlisi, es proposa augmentar lleugerament l'àrea en planta de les hidroales i fer una segona anàlisi per tal de veure si els rangs de valors d'angle d'atac mitjançant els quals es pot enlairar l'embarcació es veu augmentat i així tenir més criteris per continuar amb la selecció.

L'augment de l'àrea en planta es farà mantenint la corda de la hidroala, ja que correspon a la longitud característica  $\mathcal{L}$  utilitzada pel càlcul del nombre de Reynolds (equació 4.2) de les simulacions i, si es modifiqués, els valors dels coeficients obtinguts mitjançant les simulacions no serien vàlids. Per tant, s'ha de créixer en envergadura, fet que provocarà un augment de la relació d'aspecte AR (equació 4.10).

S'augmenta l'àrea en planta de les hidroales un 25% i un 40% per observar quines millores s'introdueixen en les sustentacions dels perfils. Introduint aquests canvis s'està modificant mitjançant l'equació 5.2 el valor de  $C_{Lmin}$  necessari per a l'elevació de la totalitat del casc per sobre el nivell del mar.

Pel cas de l'augment del 25% de l'àrea en planta es tindrà una envergadura de 2,5 m i una relació d'aspecte de 5, compresa entre l'interval de 3 a 5, recomanat en la bibliografia consultada.

$$A_p = 2,5 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} = 1,25 \text{ m}^2/\text{hidroala}$$

$$AR = \frac{2,5 \text{ m}}{0,5 \text{ m}} = 5$$

I pel cas de l'augment del 40% de l'àrea en planta es tindrà una envergadura de 2,8 m i una relació d'aspecte de 5,6. En aquest cas el valor de relació d'aspecte és lleugerament superior a l'interval de 3 a 5 recomanat en la bibliografia, però cal recordar que els perjudicis dels remolins a la punta de la hidroala es fan més evidents per valors d'AR baixos (com més alts, més es tendeix al model bidimensional de la hidroala).

$$A_p = 2,8 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} = 1,4 \text{ m}^2/\text{hidroala}$$

$$AR = \frac{2,8 \text{ m}}{0,5 \text{ m}} = 5,6$$

### 5.3.3 Segona anàlisi

#### 5.3.3.1 Perfil EPPLER 817 HYDROFOIL AIRFOIL

Mitjançant l'augment de l'àrea en planta en un 25% i en un 40% es pot observar a la taula 5.10 que es tenen tres valors d'angle d'atac pels que l'embarcació s'enlaira respecte el mar ( $p \geq 1$ ). El valor de rendiment màxim està inclòs en aquest interval. S'ha aconseguit augmentar el rang de valors que aconsegueixen enlairar l'embarcació de l'aigua. Concretament puja en  $1^\circ$  quan s'augmenta en el 25% l'àrea en planta i puja  $1^\circ$  també – gairebé  $2^\circ$  – augmentant en el 40% l'àrea en planta. Continua sent un rang petit –de  $2^\circ$ – el d'angles que permeten elevar tota l'embarcació.

$\alpha$	$C_L$	$x1,25A_p$	$C_{Lmin}$	$p$	$x1,40A_p$	$C_{Lmin}$	$p$
3	0,8389		2,0308	0,4131		1,8132	0,4626
4	0,9420		1,5237	0,6182		1,3604	0,6924
5	1,0530		1,2195	0,8635		1,0888	0,9671
6	1,1628		1,0168	1,1436		0,9079	1,2808
7	1,2585		0,8721	1,4430		0,7787	1,6162
8	1,3658		0,7637	1,7884		0,6819	2,0030

Taula 5.10

#### 5.3.3.2 Perfil EPPLER E836 HYDROFOIL AIRFOIL

Aquest perfil, que ja presentava un bon rang de valors d'angle d'atac pels que  $p \geq 1$ , en augmentar l'àrea en planta de les hidroales ha millorat encara més i continua destacant respecte la resta, tal com es pot observar a la taula 5.11. La gran majoria de valors de l'interval d'angles d'atac amb rendiment òptim també proporcionen una sustentació suficient per a la compensació del pes de l'embarcació.

Quan s'augmenta un 25% l'àrea en planta de les hidroales, puja en  $1^\circ$  el rang d'angles d'atac que són capaços d'enlairar l'embarcació; si s'augmenta un 40% respecte l'àrea original, el rang d'angles d'atac puja  $2^\circ$ .

$\alpha$	$C_L$	$x1,25A_p$	$C_{Lmin}$	$p$	$x1,40A_p$	$C_{Lmin}$	$p$
6	0,6824		1,0168	0,6711		0,9079	0,7517
7	0,7907		0,8721	0,9066		0,7787	1,0154
8	0,8962		0,7637	1,1735		0,6819	1,3143
9	0,9984		0,6794	1,4695		0,6066	1,6459
9,1	0,9980		0,6720	1,4851		0,6000	1,6633
10	1,0973		0,6121	1,7927		0,5465	2,0079
11	1,1918		0,5570	2,1395		0,4973	2,3962
12	1,2400		0,5112	2,4257		0,4564	2,7168
13	1,3240		0,4725	2,8022		0,4219	3,1384

Taula 5.11

Per tant, aquest perfil genera la sustentació necessària per compensar el pes de l'embarcació per pràcticament qualsevol dels angles d'atac considerats dins el rang d'angles que permeten treballar el perfil amb un rendiment òptim o molt elevat.

### 5.3.3.3 Perfil NACA 63-412

Augmentant tant un 25% com un 40% l'àrea en planta de les hidroales, per aquest perfil s'aconsegueix augmentar en 1° el rang de valors d'angle d'atac que permeten enlairar l'embarcació. Cal remarcar que aquest valor correspon a l'angle d'atac pel qual el perfil treballa amb un rendiment òptim, aspecte molt positiu (vegeu taula 5.12).

$\alpha$	$C_L$	$x1,25A_p$	$C_{Lmin}$	$p$	$x1,40A_p$	$C_{Lmin}$	$p$
2	0,6207		3,0455	0,2038		2,7192	0,2283
3	0,7337		2,0308	0,3613		1,8132	0,4046
4	0,8479		1,5237	0,5565		1,3604	0,6233
5	0,9602		1,2195	0,7874		1,0888	0,8819
6	1,0716		1,0168	1,0539		0,9079	1,1804
7	1,1463		0,8721	1,3144		0,7787	1,4721
8	1,2302		0,7637	1,6108		0,6819	1,8041
9	1,3234		0,6794	1,9478		0,6066	2,1815
10	1,4118		0,6121	2,3066		0,5465	2,5834

Taula 5.12

D'altra banda, de tot l'interval d'angles d'atac considerat que maximitza el rendiment del perfil, poc més de la meitat d'aquests angles permeten compensar el pes total de l'embarcació.



#### 5.3.3.4 Perfil GOE 766 AIRFOIL

En aquest cas, l'augment de l'àrea en planta en un 25% pràcticament no canvia la situació. Gairebé s'aconsegueix augmentar en 1° el rang d'angles d'atac que generen sustentació suficient. Augmentant aquesta àrea un 40%, s'aconsegueix augmentar el rang comentat en 1°. En aquest últim cas, de tot el rang d'angles d'atac que maximitzen el rendiment del perfil, pràcticament tots compensen el pes de l'embarcació, aspecte molt positiu per a l'aprofitament de les prestacions del perfil (vegeu taula 5.13).

$\alpha$	$C_L$	$x1,25A_p$	$C_{Lmin}$	$p$	$x1,40A_p$	$C_{Lmin}$	$p$
6	0,7406		1,0168	0,7283		0,9079	0,8157
7	0,8532		0,8721	0,9783		0,7787	1,0957
8	0,9634		0,7637	1,2615		0,6819	1,4128
9	1,0763		0,6794	1,5841		0,6066	1,7742
10	1,1831		0,6121	1,9329		0,5465	2,1649
11	1,2862		0,5570	2,3090		0,4973	2,5861

Taula 5.13

### 5.3.4 Segona comparativa de perfils i assignació del perfil òptim

#### 5.3.4.1 Segona comparativa de característiques dels perfils

Primerament es pot observar a la taula 5.14 els resultats de la primera anàlisi, per un valor d'àrea en planta de les hidroales d'1 m<sup>2</sup>. A continuació, a la taula 5.15 es troben les dades dels diversos perfils un cop s'ha augmentat l'àrea en planta en un 25% i en un 40%.

Perfil	$[\alpha_1, \alpha_2]$	$\alpha_2 - \alpha_1 (\Delta\alpha)$	$\alpha(\beta_{max})$	Interval $d'\alpha / p \geq 1$	$\Delta\alpha / p \geq 1$
E817	[ 3° , 8° ]	5°	7°	[ 7° , 8° ]	1°
E836	[ 6° , 13° ]	7°	9,1°	[ 9° , 13° ]	4°
NACA 63-412	[ 2° , 10° ]	8°	6°	[ 7° , 10° ]	3°
GOE 766	[ 6° , 11° ]	5°	8°	[ 8° , 11° ]	3°

Taula 5.14

Perfil	$x1,25A_p$	Interval $d'\alpha / p \geq 1$	$\Delta\alpha / p \geq 1$	$x1,40A_p$	Interval $d'\alpha / p \geq 1$	$\Delta\alpha / p \geq 1$
E817		[ 6° , 8° ]	2°		[ 6° , 8° ]	2°
E836		[ 8° , 13° ]	5°		[ 7° , 13° ]	6°
NACA 63-412		[ 6° , 10° ]	4°		[ 6° , 10° ]	4°
GOE 766		[ 8° , 11° ]	3°		[ 7° , 11° ]	4°

Taula 5.15

Mitjançant la comparació de les dues taules anteriors es pot extreure diversa informació dels perfils:

- El perfil E817 experimenta un augment d'1° en el rang de valors d'angle d'atac que compensa el pes de l'embarcació mitjançant l'augment de l'àrea en planta de les hidroales. Tot i així, aquest interval és la meitat d'ample que l'interval d'angles d'atac pel qual es maximitza el rendiment del perfil. Per tant, es considera que hi ha un desaprofitament de les prestacions d'aquest perfil.

- El perfil E836 és el cas d'un perfil amb aprofitament pràcticament total de les seves prestacions pel que fa a maximització de rendiment. El rang d'angles d'atac pels que el rendiment es maximitza és de  $7^\circ$ ,  $4^\circ$  dels quals són capaços d'equilibrar la força del pes de l'embarcació considerant l'àrea en planta de les hidroales de la primera anàlisi. Augmentant aquesta àrea en un 25% s'aconsegueix que l'aprofitament del primer rang comentat sigui de  $5^\circ$  dels  $7^\circ$  que té l'interval, mentre que augmentant-la en un 40% l'aprofitament és de  $6^\circ$  dels  $7^\circ$  possibles. Pel valor d' $\alpha$  que no s'arriba a compensar la totalitat del pes, se'n compensa un 75,2%. Per tant, es pot afirmar que el perfil proporciona la sustentació mínima necessària pràcticament en tot l'interval d'angles d'atac  $\alpha$  amb rendiment maximitzat.
- El perfil NACA 63-412 té un rang de valors d' $\alpha$  que maximitzen el rendiment de  $8^\circ$ . D'aquests  $8^\circ$  amb l'àrea en planta inicial només  $3^\circ$  són capaços de compensar el pes de l'embarcació, fet que significa un desaprofitament de les prestacions de les hidroales. Augmentant l'àrea en un 25% i en un 40% s'obtenen els mateixos resultats que es resumeixen en l'augment d' $1^\circ$ , de  $3^\circ$  a  $4^\circ$  el rang de valors d' $\alpha$  que permeten enlairar el casc de l'aigua completament. Aquest fet implica que com a màxim s'està aprofitant la meitat del rang de valors d' $\alpha$  que maximitza el rendiment del perfil i, per tant, n'està limitant el funcionament.
- Pel que fa al perfil GOE 766, amb l'àrea en planta inicial les hidroales poden compensar el pes total amb més de la meitat del rang de valors d'angles d'atac amb rendiment maximitzat. L'efecte d'augmentar en un 25% l'àrea no contribueix a l'augment d'aquest rang, mentre que augmentant l'àrea en un 40% s'aconsegueix augmentar aquest rang en  $1^\circ$ . En aquest últim cas, les hidroales poden enlairar l'embarcació en  $4^\circ$  dels  $5^\circ$  que permeten treballar el perfil amb un rendiment òptim.

Per acabar l'anàlisi a la taula 5.16 es mostren, per cada perfil, els coeficients de sustentació màxims i els coeficients de resistència a l'avanç mínims. És important recordar que hi ha diversos criteris de selecció de perfils i s'ha d'escollir en funció de les especificacions de cada embarcació. A tall d'anècdota, es pot observar que curiosament els tres perfils que presenten els coeficients de sustentació més elevats han estat descartats durant la primera anàlisi dels perfils per tenir un rendiment aerodinàmic menys estable que la resta.

També es pot observar en aquesta taula que per tots els intervals d'angles d'atac considerats dels diversos perfils, cap d'ells pateix entrada en pèrdua, ja que l'angle d'atac pel que la seva sustentació és màxima és més elevat que el valor més gran dels seus intervals. D'aquesta manera s'assegura que el perfil no perdrà la capacitat de generar sustentació.

<i>Perfil</i>	$C_{Lmax}$	$\alpha (C_{Lmax})$	$C_{Dmin}$	$\alpha (C_{Dmin})$
<i>E817</i>	1,9188	16°	0,003585	-1°
<i>E836</i>	1,42244	15°	0,00379	0°
<i>FX 63-137</i>	2,37523	12°	0,005164	-3°
<i>FX 66-S-196</i>	1,46452	14°	0,0046	-2°
<i>NACA 4415</i>	2,11135	18°	0,005503	-2°
<i>NACA 63-412</i>	1,68823	14°	0,004281	0°
<i>GOE 417</i>	2,06903	16°	0,005232	-2°
<i>GOE 766</i>	1,7016	17°	0,005121	2°

Taula 5.16

### 5.3.4.2 Assignació del perfil òptim i obtenció de resultats

Es consideren diversos factors per a l'assignació del perfil òptim per a l'aplicació proposada:

- El perfil E817 presenta un rang de treball molt reduït en què es pot compensar el pes de l'embarcació ( $p \geq 1$ ), de tan sols  $2^\circ$ . Degut que l'embarcació podria canviar l'angle d'atac dels perfils bruscament per causa de l'onatge o una ràfega de vent, es considera que aquest rang de treball no és suficient.
- El perfil E836 és el que presenta el rang de treball més ample de tots, independentment de si s'augmenta o no l'àrea en planta de les hidroales. Augmentant en un 25% o en un 40% l'àrea de les hidroales s'aconsegueix un rang de treball pel que l'embarcació s'enlaira de  $5^\circ$  i  $6^\circ$  respectivament, dels  $7^\circ$  que té el rang d'angles amb rendiment màxim.
- El perfil NACA 63-412 també té un interval d'angles d'atac amb rendiment màxim molt elevat, però el seu aprofitament és inferior al perfil E836 ja que només s'aprofita com a màxim  $4^\circ$  pels que  $p \geq 1$  –augmentant l'àrea de les hidroales– dels  $8^\circ$  que té de rendiment màxim. Augmentant encara més l'àrea en planta d'aquest perfil es podria aconseguir que tot el rang treballés compensant el pes, però també hi hauria més fricció. A més, el perfil E836 amb menys superfície que el NACA 63-412 ja podria donar la sustentació necessària per tot el seu rang de valors. Per tant, augmentar més la superfície no té sentit quan ja hi ha un altre perfil que presenta bones prestacions sense aquest segon augment de la superfície.
- El perfil GOE 766, quan se li augmenta l'àrea en planta de les hidroales en un 40%, presenta una millora en l'aprofitament del seu rendiment ja que en  $4^\circ$  dels  $5^\circ$  es pot compensar el pes de l'embarcació. Tot i així, un rang de treball de  $4^\circ$  continua essent reduït.

Per aquests motius, el perfil escollit per a la implementació d'hidroales a l'embarcació AC72 és el perfil EPPLER E836 HYDROFOIL AIRFOIL. Serà necessari l'augment de l'àrea en planta en un 25% o en un 40% per tal que les hidroales puguin fer volar l'embarcació per un rang d'angles d'atac elevat.

Els valors dels coeficients de sustentació i resistència a l'avanç resultants són els següents:

$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$x1,25A_p$	$C_{Lmin}$	$p$	$x1,40A_p$	$C_{Lmin}$	$p$
6	0,6824	0,0073		1,0168	0,6711		0,9079	0,7517
7	0,7907	0,0080		0,8721	0,9066		0,7787	1,0154
8	0,8962	0,0088		0,7637	1,1735		0,6819	1,3143
9	0,9984	0,0096		0,6794	1,4695		0,6066	1,6459
9,1	0,9980	0,0096		0,6720	1,4851		0,6000	1,6633
10	1,0973	0,0107		0,6121	1,7927		0,5465	2,0079
11	1,1918	0,0118		0,5570	2,1395		0,4973	2,3962
12	1,2400	0,0129		0,5112	2,4257		0,4564	2,7168
13	1,3240	0,0148		0,4725	2,8022		0,4219	3,1384

Taula 5.17

Dels valors de  $C_L$  i  $C_D$  de la taula 5.17 se n'extreu que la força de sustentació realitzada per les dues hidroales juntes estarà entre els 38842 N i els 162189 N i que la força de resistència a l'avanç de les dues hidroales juntes estarà entre els 416 N i els 1813 N per a una àrea en planta de 1,25 m<sup>2</sup>. Per a una àrea en planta d'1,4 m<sup>2</sup> la força de sustentació generada anirà entre els 43505 N i els 181652 N i la força de resistència a l'avanç estarà compresa entre 465 N i 2031 N (calculat mitjançant les equacions 4.4, 4.5 i 5.1).

És important notar que pel fet que en certs valors d'angle es genera més sustentació que el pes de l'embarcació no implica que sortiran els *hydrofoils* de l'aigua en la seva totalitat i estarà tota l'embarcació literalment volant. Les hidroales estan disposades amb una certa inclinació tal com es mostra a la figura A.6 de l'annex A en forma de V. Per tant, en cas de generar més sustentació que el pes de l'embarcació la hidroala passaria a no estar totalment submergida i tallaria la superfície de l'aigua. Per tant, l'àrea en planta efectiva de la hidroala disminuiria fins que s'equilibrassin sustentació i pes. Per tant, es pot dir que aquestes hidroales són autoestabilitzants.

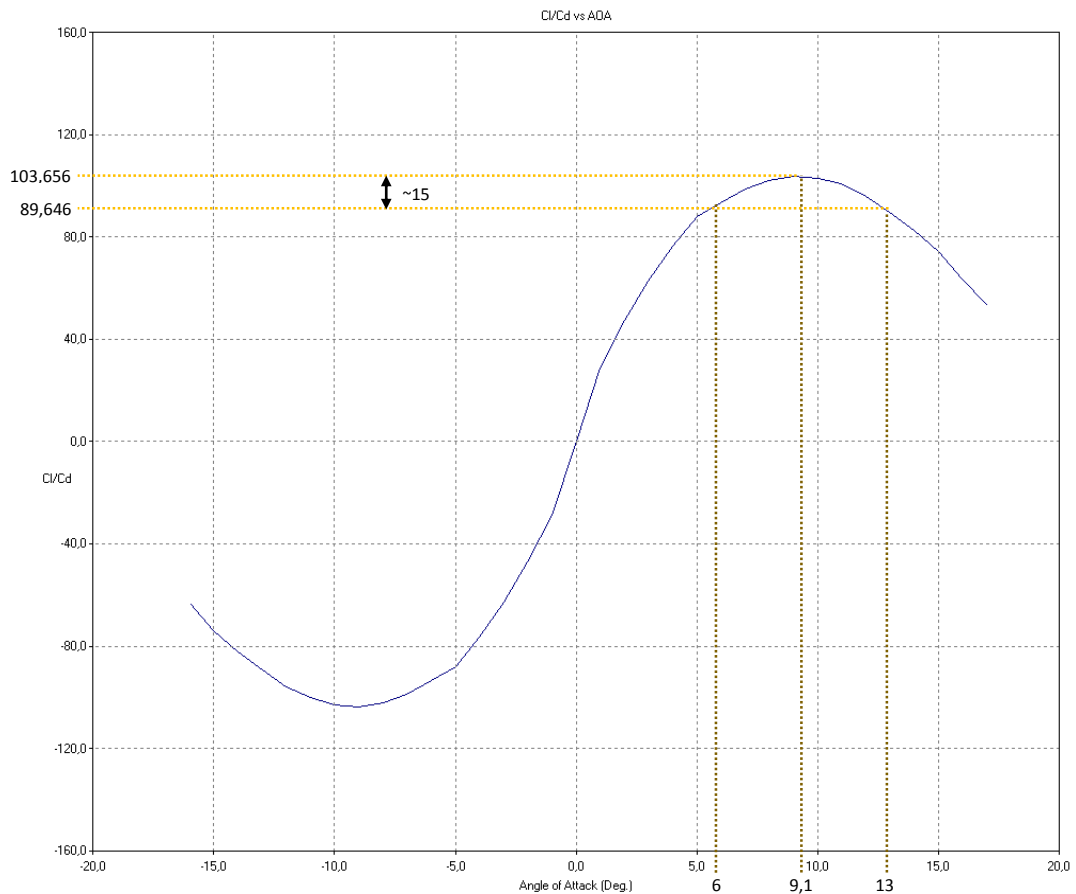


Figura 5.9: E836 - Gràfica del rendiment  $C_L/C_D$  del perfil en funció d' $\alpha$

A continuació es mostren diverses figures que ens aporten informació del perfil i de com treballa quan està orientat amb l'angle d'atac pel qual el seu rendiment és òptim ( $9,1^\circ$ ).

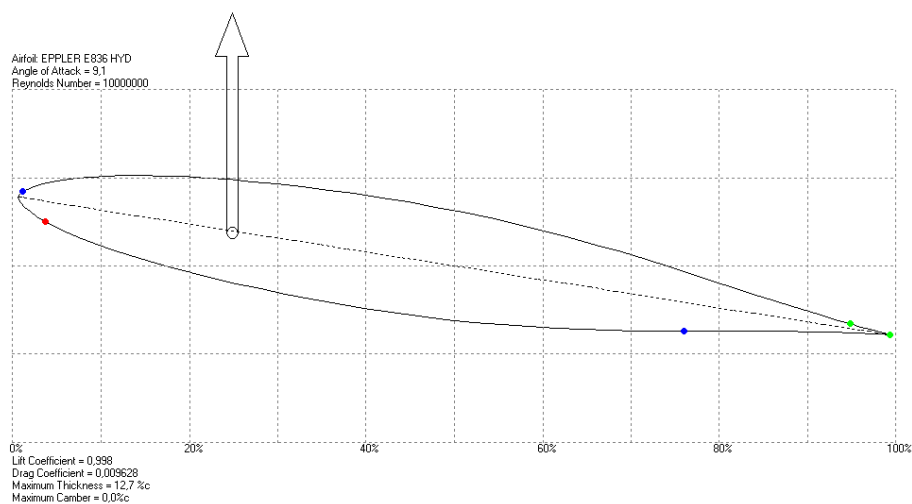


Figura 5.10: E836 – Geometria del perfil i punts d'estancament, transició i separació per  $\alpha = 9,1^\circ$



A la figura 5.9 es pot observar el rang d'angles d'atac que maximitzen el rendiment, segons el criteri escollit, mentre que a la figura 5.10 es pot observar el perfil amb angle d'atac  $9,1^\circ$ , la sustentació i el seu punt d'aplicació, i els punts d'estancament, de transició i de separació de la capa límit. Es pot observar que la transició a capa límit turbulenta a l'extradós està molt avançada, però que el seu despreniment es dona pràcticament al caire de sortida.

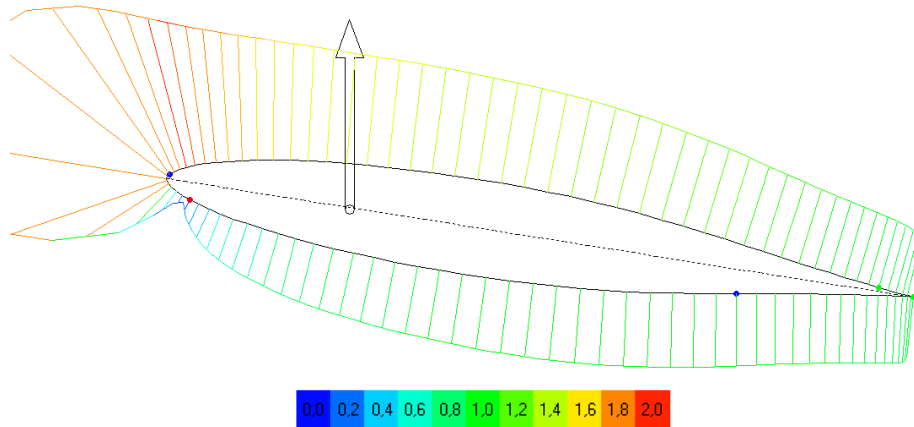


Figura 5.11: E836 – Distribució de velocitats entorn el perfil per  $\alpha=9,1^\circ$

A la figura 5.11 es pot observar la distribució de velocitats entorn el perfil, que són superiors a l'extradós i inferiors a l'intradós. D'altra banda, a la f hi ha la distribució de pressions al voltant del perfil on es pot observar una gran depressió al caire d'atac per la zona de l'extradós. També s'observa que al llarg de l'extradós hi ha depressió i per la zona de l'intradós hi ha una pressió positiva.

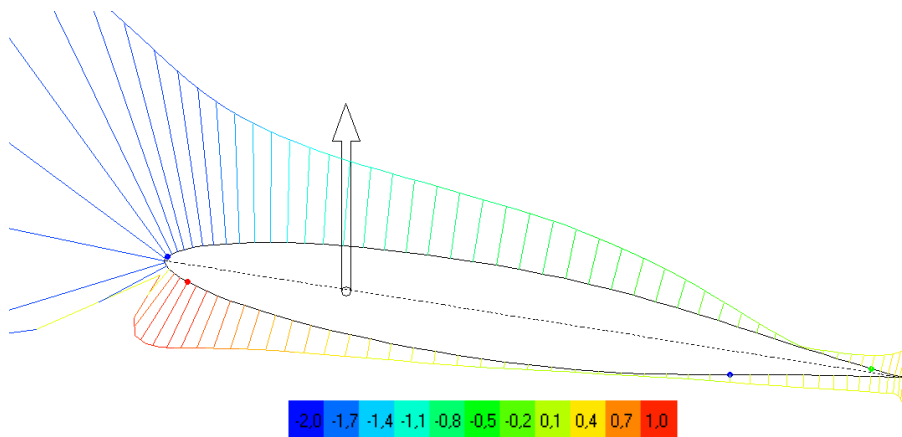


Figura 5.12: E836 – Distribució de pressions entorn el perfil per  $\alpha=9,1^\circ$  amb el seu coeficient

Els valors de la llegenda corresponen al coeficient de pressions

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \quad \text{Equació 5.3}$$

—paràmetre útil per a l'estudi de fluxos incompressibles— que, mitjançant l'equació de Bernoulli (equació 4.13) considerant un flux incompressible, sense pèrdues i estacionari queda com  $C_p = 1 - \left(\frac{u}{u_\infty}\right)^2$ . D'aquesta manera un  $C_p = 0$  indica que el punt en qüestió es troba a la mateixa pressió que el flux no pertorbat. Un valor de  $C_p = 1$  indica que el punt estudiat és un punt d'estancament (amb  $u = 0$ ).

La pressió de vapor de l'aigua salada a 20°C és de  $p_v = 2,29 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$  [14]. Mitjançant la condició expressada a l'equació 4.14 es dedueix que per evitar el fenomen de la cavitació es necessita que en el punt del perfil on hi ha la màxima depressió, aquesta pressió no sigui inferior a la pressió de vapor de l'aigua.

El programari VisualFoil 4.1 utilitzat per a les simulacions del perfil és molt útil per a l'obtenció de dades com la sustentació i la resistència a l'avanç, però presenta limitacions en l'obtenció de dades relacionades amb les pressions entorn el perfil. Per aquest motiu es fa difícil l'anàlisi del fenomen de la cavitació a les hidroales. En aquest sentit, seria necessari un programari amb la capacitat de calcular la distribució de pressions del perfil simulat.

Tot i no poder determinar amb precisió per mitjà d'una simulació si el perfil cavitaria, gràcies als múltiples experiments i aplicacions que s'han realitzat amb ales al llarg dels anys, pràcticament es podria assegurar que les hidroales cavitaran. Ho faran amb una cavitació de bombolles, formant una espècie de núvol tal com s'ha vist a l'apartat 4.2.3.. També s'ha comentat a l'apartat sobre cavitació quines mesures es poden prendre per intentar evitar aquest fenomen. Malauradament les variables mitjançant les quals es podria evitar la cavitació —temperatura i pressió del fluid de treball— són variables no controlables del sistema i, com a conseqüència, no es pot realitzar cap acció per evitar aquest fenomen.

El que sí que es podrà realitzar és un manteniment preventiu de les hidroales desmuntant-les periòdicament de l'embarcació i observar en detall quins han estat els desperfectes ocasionats. Com a solucions al desgast dels *hydrofoils* hi hauria l'opció d'afegir material on

hi hagi forats degut a l'erosió de la superfície o la substitució de les hidroales actuals per unes de noves si els desperfectes són considerables.

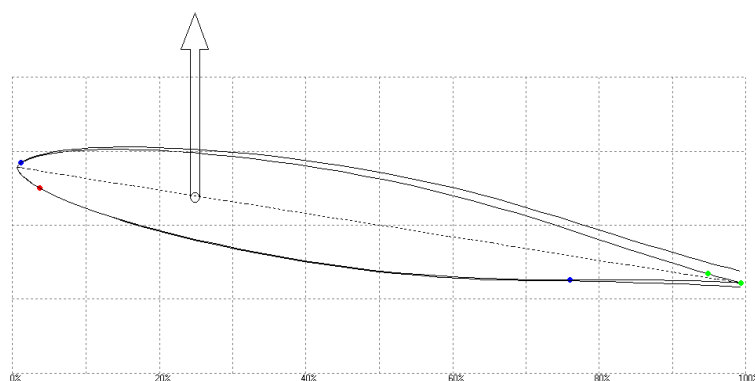


Figura 5.13: E836 – Geometria del perfil, capa límit, i punts d'estancament, transició

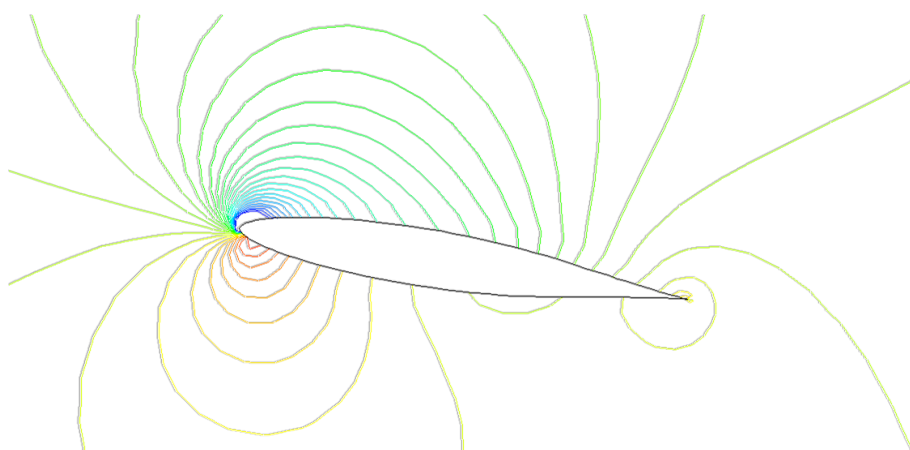


Figura 5.14: E836 – Isòbares entorn el perfil per  $\alpha=9,1^\circ$

Es pot observar com la capa límit es mantindrà propera al perfil a la figura 5.13, generant una resistència a l'avanç reduïda. També es mostren les figures 5.14 i 5.15 amb les línies de corrent i les isòbares entorn el perfil respectivament.

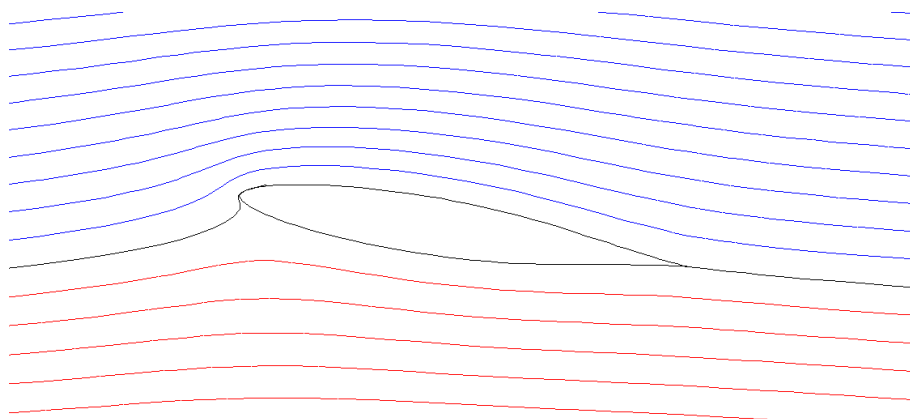


Figura 5.15: E836 – Línies de corrent entorn el perfil per  $\alpha=9,1^\circ$

## 6 PLANIFICACIÓ TEMPORAL I COSTOS

---

La durada del Treball de Fi de Grau és d'un quadrimestre i per tal d'organitzar bé les seves diverses fases s'ha utilitzat l'eina "Planifica't" de la UPC, emmarcada dins l'*Ús solvent dels recursos d'informació* –competència transversal a assolir durant els estudis de Grau a l'ETSEIB.

A la figura 6.1 es mostra la planificació del projecte mitjançant un diagrama de Gantt, que mostra les diferents etapes i el temps dedicat a cada una d'elles concretant dates d'inici i de fi de cada tasca.

D'altra banda, també s'ha d'analitzar la viabilitat econòmica del projecte. S'ha realitzat un pressupost del projecte com si es tractés d'un projecte que encarrega un client a una empresa d'enginyeria (taula 6.1).

D'altra banda també es podria calcular l'amortització d'aquest projecte per part del client que l'encarrega. L'amortització del projecte pel cas d'una embarcació de vela –com l'AC72– es podria considerar en cas que el premi de guanyar les regates a les que participés tingués compensació econòmica. En cas de no obtenir compensació econòmica, el cost per part del client que ha encarregat el projecte d'estudi de la incorporació d'hidroales a la seva embarcació aniria al seu càrrec íntegrament.

També es podria considerar que l'embarcació a la que se li vol incorporar hidroales té com a mitjà de propulsió un motor de combustió. Degut a l'estalvi de combustible –fins a un 30% (apartat 4.1.1)– gràcies a la incorporació d'hidroales a l'embarcació, en funció de la freqüència d'ús i la distància recorreguda, es podria arribar a calcular l'amortització del cost del projecte. Tot i així, en sortiria un període de retorn considerable.

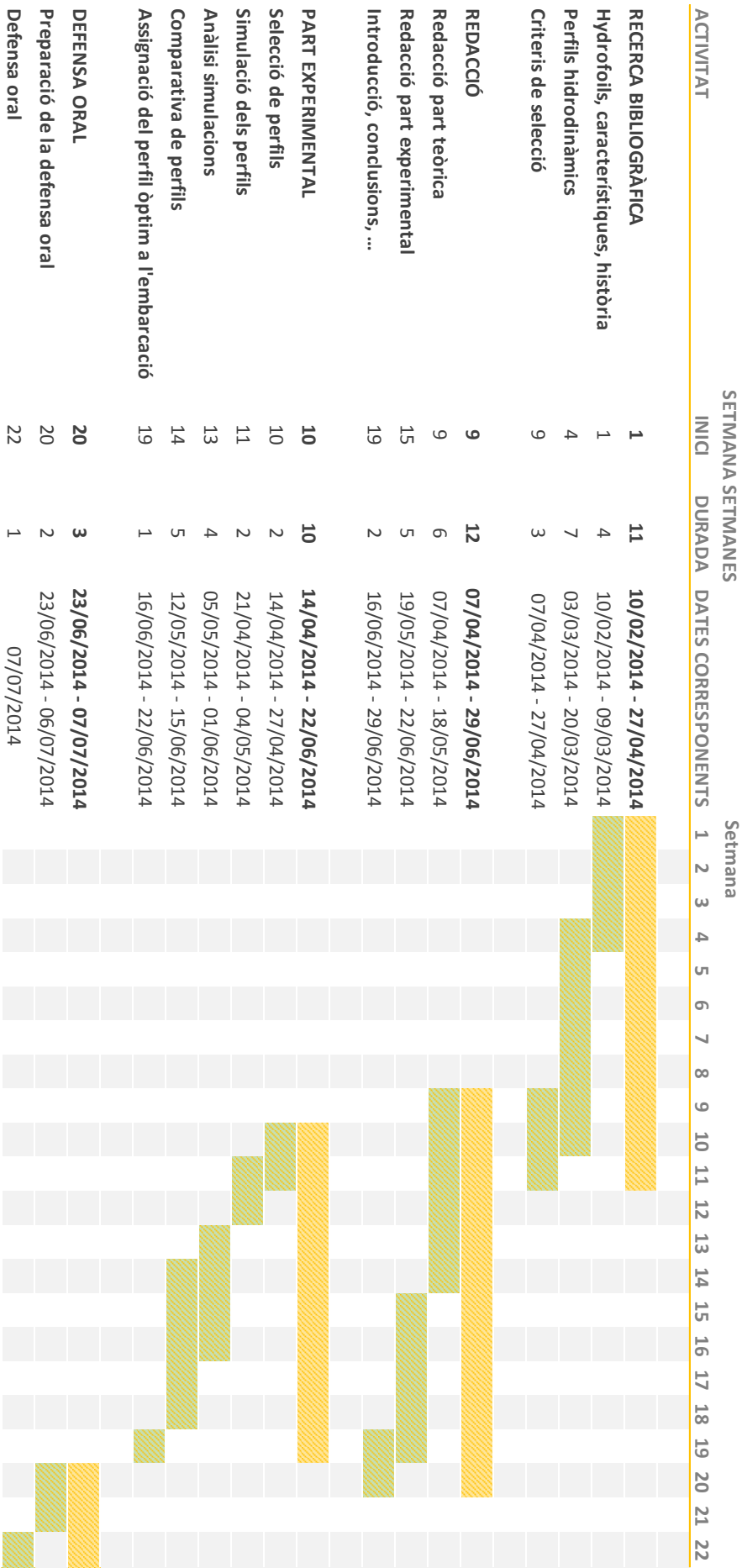


Figura 6.1: Diagrama de Gantt amb la planificació del Treball Fi de Grau

## PRESSUPOST DEL PROJECTE

Juliol 2014

4299,57 €

QUANTITAT	CONCEPTE	PREU UNITARI	IMPORT
42,0	Recerca (hores)	22,50	945,00
14,0	Simulació (hores)	29,00	406,00
14,0	Amortització software de simulació	7,99	111,86
33,0	Anàlisi de dades (hores)	29,00	957,00
47,0	Informe (hores)	22,50	1057,50
1,0	Material d'ofimàtica	76,00	76,00
			Total net 3553,36 €
			IVA (21%) 746,21 €
			<b>TOTAL 4299,57 €</b>

Taula 6.1

En aquest pressupost s'hi han comptabilitzat les hores aproximades que una empresa d'enginyeria hauria d'invertir en la realització d'aquest projecte. S'han inclòs les hores de recerca d'informació sobre el tema, les hores de simulació dels diversos perfils, l'amortització del programari de simulació, la realització d'un informe detallat dels resultats obtinguts i la posterior discussió i, finalment, el material ofimàtic utilitzat.

El pressupost total del projecte ascendeix als 4299,57 €, quantitat raonable per un projecte d'aquestes característiques.



## 7 IMPACTE MEDI AMBIENTAL

---

Hi ha diversos aspectes mediambientals a comentar respecte aquest projecte.

L'elecció del criteri de selecció del perfil òptim ha estat respectuosa amb el medi ambient. Com objectius, s'ha pensat maximitzar la sustentació del perfil i també minimitzar la resistència a l'avanç. D'aquests dos objectius, com que només es pot optimitzar un paràmetre, n'ha sorgit la maximització del rendiment aerodinàmic  $C_L/C_D$  que fa que es sacrifiqui sustentació per tal de treballar en un punt amb menys resistència a l'avanç. Aquest fet és molt important per disminuir la força de propulsió necessària per a l'avanç de l'embarcació, vagi amb motor o amb vela. Si va amb motor s'estalvia combustible. Pel cas d'una embarcació de vela, el cost de la propulsió mitjançant el vent per a l'ésser humà pot semblar nul, però s'ha de tenir en compte que l'energia presa del vent per a la propulsió de l'embarcació modifica la trajectòria original del vent i potser algun ecosistema es podria veure modificat –tema important també en parcs eòlics, per exemple. Per tant, en embarcacions de vela també és important reduir la resistència a l'avanç.

D'altra banda, per tractar-se d'un treball d'estudi i simulació, s'han consumit pocs recursos materials. El consum que hi ha hagut és el de l'energia elèctrica consumida pels ordinadors. I béns materials utilitzats han estat els consumibles necessaris per a la materialització d'aquest treball. Gran part de la informació buscada s'ha obtingut de la biblioteca o d'internet, fet que ha comportat un cost nul per obtenir la informació necessària.

Degut que es troba fora de l'abast, no hi ha hagut etapa constructiva d'una hidroala. D'aquesta manera s'ha evitat l'ús de resines que acostumen a ser contaminants pel medi ambient i perjudicials per a les persones.





## CONCLUSIONS

---

De la realització d'aquest Treball de Fi de Grau se'n poden extreure diverses conclusions.

S'ha pogut conèixer quin és el funcionament de les hidroales i les seves aplicacions. Les hidroales presenten nombrosos avantatges però de moment encara presenten alguns inconvenients que fan que siguin relativament poc utilitzades. Els principals usos que presenten actualment són de transport en rius i llacs i en esports aquàtics o navegació. Les últimes dues aplicacions són les més actives actualment i permeten continuar investigant en el desenvolupament d'hidroales.

Les hidroales han de treballar en un rang en què el rendiment del perfil sigui òptim per utilitzar-ne les màximes prestacions. Si per l'aplicació que se li vol donar no es pot aconseguir treballar en aquest rang, significa que aquest perfil no és adequat.

Per poder comparar amb igualtat de condicions diversos perfils, s'han d'establir uns criteris d'avaluació –quantitatius i no qualitatius– iguals per a tots els perfils. D'aquesta manera, si un perfil presenta un bon rang d'angles d'atac en què treballa a la zona òptima, pot no ser el perfil òptim en el cas que se li hagi hagut d'augmentar l'àrea en planta més que a un altre perfil.

El millor criteri de selecció a escollir per a la incorporació d'hidroales a una embarcació és la maximització del rendiment del perfil, ja que diversos perfils són capaços de generar la sustentació necessària per compensar el pes de l'embarcació i, a més, es redueix significativament la resistència a l'avanç comparat amb el cas de maximització de la sustentació del perfil. D'aquesta manera, es redueix considerablement la força de propulsió necessària per fer avançar l'embarcació i es poden assolir velocitats més elevades.

Mitjançant aquest criteri s'ha assignat un perfil òptim –el perfil Eppler E836– per a les hidroales que es podrien incorporar a l'embarcació AC72. També se n'han recomanat unes dimensions de corda i envergadura per al bon aprofitament de la zona de treball òptima del perfil E836.

Les hidroales presenten inevitablement el fenomen de la cavitació. Seria necessari, fer una simulació numèrica en un CFD per poder visualitzar bé les línies de corrent i el camp de

pressions per poder avaluar millor la cavitació, estudi que no es trobava dins l'abast d'aquest projecte i que podria ser una futura proposta de Treball de Fi de Grau.

## AGRAÏMENTS

---

Agraeixo al meu tutor, el Professor Sr. Enric Trillas el fet que oferís aquest treball i que m'animés a realitzar-lo, així com també el seu temps dedicat a la tutorització d'aquest treball, orientant-me en el seu desenvolupament i facilitant-me el programari de simulació i informació diversa.

També m'agradaria agrair a la meva família el seu suport incondicional i la seva comprensió, tant en aquest quadrimestre com en els últims anys.



## BIBLIOGRAFIA

---

### REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- [1] "Hydrofoil World." [En línia]. Disponible a:  
<http://www.hydrofoilworld.org/theater/>. [Visitat: 03/05/2014].
- [2] "TERMCAT. – Diccionari d'esports nàutics." [En línia]. Disponible a:  
[http://www.termcat.cat/ca/Diccionaris\\_En\\_Linia/10/Cerca/](http://www.termcat.cat/ca/Diccionaris_En_Linia/10/Cerca/). [Visitat: 05/05/2014].
- [3] "Hydrofoils." [En línia]. Disponible a:  
<http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/hydrofoil.htm>. [Visitat: 17/04/2014].
- [4] T. Rosado, "How a Hydrofoil Works," 1999. [En línia]. Disponible a:  
<http://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>. [Visitat: 17/04/2014].
- [5] "Hydroptère - The boat," 2012. [En línia]. Disponible a:  
<http://hydroptere.com/en/the-sailing-boats/l-hydroptere-en/>. [Visitat: 14/05/2014].
- [6] J. D. Anderson, *Fundamentals of aerodynamics*. New York :: McGraw-Hill, 2011.
- [7] E. Trillas i Gay, *Aerodinàmica industrial*. [Barcelona :: ETSEIB. CPDA, 2007.
- [8] M. Sadraey and D. W. College, "Chapter 5 Wing Design," 2013.
- [9] F. M. White, *Mecánica de fluidos*. Madrid [etc.] :: McGraw-Hill, 2008, pp. 492–565.
- [10] *Màquines hidràuliques : Transparències*. Barcelona :: ETSEIB. CPDA, 1998.
- [11] P. Eisenberg, "Cavitation," in *Fluid Dynamics*, .
- [12] "Cavitation - an Introduction." [En línia]. Disponible a:  
[http://www.engineeringtoolbox.com/cavitation-d\\_407.html](http://www.engineeringtoolbox.com/cavitation-d_407.html). [Visitat: 18/04/2014].
- [13] "Hydrofoils: Flying on Water," *America's Cup*, 2013. [En línia]. Disponible a:  
<https://www.youtube.com/watch?v=pRQJRhPg6J8&list=UU0gzXt1Ms4WVQ7tyGgjTmqA>. [Visitat: 07/06/2014].
- [14] National Physical Laboratory, "Physical properties of sea water," 2014. [En línia].  
Disponible a: [http://www.kayelaby.npl.co.uk/general\\_physics/2\\_7/2\\_7\\_9.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html).  
[Visitat: 07/06/2014].
- [15] "Airfoil Investigation Database," 2013. [En línia]. Disponible a:  
<http://www.airfoildb.com/>. [Visitat: 17/04/2014].

- [16] "Hysucraft by FASTcc," 2014. [En línia]. Disponible a: <http://www.hysucraft.com/Default.aspx>. [Visitat: 05/05/2014].
- [17] J. R. Meyer, *Ships That Fly*. 1990.
- [18] "GAKEI.com | EXHIBITION HONG KONG." [En línia]. Disponible a: <http://www.gakei.com/>. [Visitat: 14/05/2014].
- [19] "America's Cup." [En línia]. Disponible a: <http://www.americascup.com/en/home.html>. [Visitat: 14/05/2014].
- [20] "Cavitation Home Page at UT Austin." [En línia]. Disponible a: <http://cavity.ce.utexas.edu/>. [Visitat: 20/04/2014].

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTÀRIA

R. Eppler, *Airfoil design and data*. Berlin :: Springer-Verlag, 1990.

M. Nakamura, "How An Airfoil Works," 1999. [En línia]. Disponible a: <http://web.mit.edu/2.972/www/reports/airfoil/airfoil.html>. [Visitat: 17/04/2014].

M. Wall, M. Drela, and S. Finberg, "Hydrofoil Basics," 1995. [En línia]. Disponible a: <http://lancet.mit.edu/deccavator/Basics.html>. [Visitat: 12/03/2014].

"Cavitation in closed piping systems." .

"UIUC Airfoil Data Site." [En línia]. Disponible a: [http://aerospace.illinois.edu/m-selig/ads/coord\\_database.html](http://aerospace.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html). [Visitat: 17/04/2014].

"America's Cup 2013 - The Boats: AC72 and AC45 Multihulls Compared - from CupInfo." [En línia]. Disponible a: <http://www.cupinfo.com/en/americas-cup-2013-boats-ac72-ac45.php>. [Visitat: 06/06/2014].

"Cavitation." [En línia]. Disponible a: <http://www.mcnallyinstitute.com/01-html/1-3.html>. [Visitat: 18/04/2014].

"Planifica't." [En línia]. Disponible a: <http://planificat.upc.edu/>. [Visitat: 11/06/2014].

"Sail-World.com : America's Cup: How hydrofoiling works in the AC72's - Video." [En línia]. Disponible a: <http://www.sail-world.com/Europe/Americas-Cup:-How-hydrofoiling-works-in-the-AC72s---Video/113043>. [Visitat: 22/04/2014].

*The Hydrofoil Resource Site*. International Hydrofoil Society.

“Airfoil Tools.” [En línia]. Disponible a: <http://airfoiltools.com/>. [Visitat: 17/04/2014].

“VisualFoil 4.1.” .

“Mendeley - Gestor de referències bibliogràfiques.” .

“FLOW AROUND AN AIRFOIL.” [En línia]. Disponible a:  
[http://www.ae.utexas.edu/~varghesep/class/Irrotational\\_Flow\\_Colombini/profilo\\_e.html](http://www.ae.utexas.edu/~varghesep/class/Irrotational_Flow_Colombini/profilo_e.html).  
[Visitat: 01/05/2014].